

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Výpočet světelného toku vyzařovaného veřejným osvětlením do
horního poloprostoru**

**Calculation of the public lighting radiation to the upper
hemisphere**

2018

Bc. Ondřej Kopa

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Kopa**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Výpočet světelného toku vyzařovaného veřejným osvětlením do horního
poloprostoru
Calculation of the public lighting radiation to the upper hemisphere
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- Rušivé světlo
- Zdroje rušivého světla
- Možnosti měření a vyhodnocování rušivého světla
- Modelování vyzařovacích charakteristik VO do horního poloprostoru
- Kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení světelného toku jdoucího do horního poloprostoru

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU, Sborníky CIE
- [4] Manuály k výpočetnímu programu (WILS)
- [5] www.csorsostrava.cz
- [6] ČSN CEN/TR 13 201-1; ČSN EN 13201-2-4 – Soubor norem pro osvětlování pozemních komunikací

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

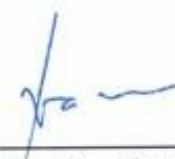
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 12. dubna 2018

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. a Ing. Petru Běčákovi za odbornou pomoc a cenné rady při realizaci této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou rušivého světla a vznikem závoje jasů, které jsou stále často probíraným tématem. Cílem je využití kulové sítě výpočetních bodů pro modelování vyzařování světelného toku jdoucího do horního poloprostoru z osvětlovacích soustav veřejného osvětlení. Konkrétně je v práci uveden příklad modelu obce Libivá nacházející se v Olomouckém kraji poblíž Mohelnice. Nejprve jsou osvětlovací soustavy veřejného osvětlení osazené vysokotlakými sodíkovými výbojkami a poté LED svítidly. V závěru je provedeno srovnání těchto dvou osvětlovacích soustav z hlediska příkonů a vyzářeného světelného toku do horního poloprostoru.

Klíčová slova

Rušivé světlo, Veřejné osvětlení, Wils, horní poloprostor, světelné znečištění, závoje jasů, oblohy, světelný tok, zdroje rušivého světla

Abstract

This diploma thesis deals with still a frequently discussed subject called the problematics of disturbing light and the appearance of veil brightness. The primary aim of the thesis is to use a spherical network of calculating points for modeling the emission of light flux flowing into the upper half-space from public lighting systems. In particular, the thesis presents an example of a model of village Libivá located in Olomouc region near to city Mohelnice. At first, public lighting systems are fitted with high pressure sodium lamps and with LED lights subsequently. In the end, the two lighting systems are compared in terms of power inputs and radiated luminous flux to the upper half-space.

Key Words

Obtrusive light, public lighting, Wils, upper hemisphere, light pollution, sky glow, luminous flux, stray light sources

Obsah

Seznam použitých symbolů	- 8 -
Seznam použitých zkratk	- 9 -
Úvod	- 10 -
1 Rušivé světlo	- 11 -
1.1 Rozdělení rušivého světlo	- 11 -
1.2 Oslnivé světlo	- 12 -
1.2.1 Rozdělení oslnivého světla	- 12 -
1.3 Závojevý jas oblohy	- 13 -
1.4 Optické zákony, vznik závojevého jasu	- 15 -
1.4.1 Odraz světelného záření	- 15 -
1.4.2 Prostup světelného záření	- 18 -
1.4.3 Absorpce světelného záření	- 19 -
1.5 Světelný přesah	- 20 -
1.6 Podíl horního světla ULR	- 20 -
1.7 Normativní požadavky na rušivé světlo	- 21 -
1.7.1 Environmentální zóny	- 23 -
2 Zdroje rušivého světla	- 24 -
2.1 Osvětlení pozemních komunikací	- 24 -
2.2 Osvětlení letišť	- 24 -
2.3 Osvětlení venkovních sportovišť	- 26 -
2.4 Osvětlení venkovních pracovišť	- 26 -
2.5 Architektonické osvětlení	- 27 -
2.6 Reklamní osvětlení	- 28 -
2.7 Vnitřní osvětlení	- 28 -
3 Možnosti měření a vyhodnocení rušivého světla	- 30 -
3.1 Hodnocení závojevého jasu oblohy	- 30 -
3.1.1 Vizuální metoda	- 30 -
3.1.2 Fotografická metoda	- 30 -
3.1.3 Měření CCD kamerou	- 31 -
3.1.4 Měření pomocí SQM (Sky Quality Meter)	- 32 -
3.2 Hodnocení světelného přesahu	- 34 -

➤	Mezinárodní doporučení	- 34 -
4	Modelování vyzařovacích charakteristik VO do horního poloprostoru	- 35 -
4.1	Vyzařování do horního poloprostoru	- 35 -
4.1.1	Zatřídění komunikace	- 36 -
4.1.2	Model vesnice s osvětlením komunikace M3 a M5	- 38 -
4.1.3	Sít' výpočetních bodů pro přímou a odraženou složku	- 40 -
4.1.4	Osvětlení komunikace pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek	- 42 -
4.1.5	Osvětlení komunikace pomocí LED svítidel	- 45 -
5	Kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení světelného toku jdoucího do horního poloprostoru- 48 -	
	Závěr	- 49 -
	Použitá literatura	- 50 -
	Seznam příloh	- 52 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
Φ	lm	celkový světelný tok
Φ_{ρ}	lm	odražený světelný tok
Φ_a	lm	pohlčený světelný tok
Φ_{τ}	lm	propuštěný světelný tok
α	-	činitel absorpce
ρ	-	činitel odrazu
τ	-	činitel prostupu
E_V	lx	vertikální osvětlenost
I_0	cd	maximální hodnota svítivosti v kolmém směru
K	-	kontrast jasů
L_a	cd·m ⁻²	jas kritického detailu
L_b	cd·m ⁻²	jas bezprostředního okolí
η	%	účinnost svítidla

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ASA	Citlivost fotografického filmu
apod.	a podobně
CCD	elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
ČR	Česká republika
ČSN	Česká státní norma
DLOR	světelný tok odražený od povrchů okolních oblastí
E	environmentální zóna
GPS	globální poziční system
IAU	mezinárodní astronomická unie
LED	polovodičový světelný zdroj (Light – emitting diode)
Obr.	obrázek
SQM	Sky Quality Meter
tab.	tabulka
tzv.	tak zvaný
ULR	poměrný přímý světelný tok do horního poloprostoru
ULOR	světelný tok vyzařovaný přímo ze svítidla do horního poloprostoru

Úvod

Rušivé světlo, veřejnosti známé jako světelné znečištění či světelný smog, se stalo důležitým problémem hlavně v posledních několika letech a to především v průmyslových a hustě osídlených oblastech světa. Už to nejsou pouze velké metropole v Americe, Japonsku atd.. Jde i o oblasti v Evropě včetně České republiky. Problém nadměrného svícení není jen vysoká spotřeba elektrické energie, ale také přisvětlení noční oblohy. Rušivé světlo můžeme považovat za vedlejší produkt rychlého ekonomického rozvoje. Na rušivé světlo se už nedíváme jen z astronomického hlediska. V dnešní době jde i o praktické dopady na běžný život. Nadměrné nasvícení oblohy začíná mít nežádoucí účinky na kvalitu života v hustě osídlených oblastech, světlo totiž může narušovat přirozený stav nočního prostředí (včetně interiéru domu). V případě oblačnosti se navíc zvyšuje světelný tok směřující k zemi a to má negativní dopad na zvířata či rostliny. Abychom byli schopni využít poznatky a požadavky na zamezení rušivého světla v praxi, je nutno problém objasnit a kvantifikovat. Na základě toho jsme schopni rozebrat možnost snížení úrovně rušivého světla, popřípadě hledat možnosti úspory energie spotřebované zbytečně na noční svícení.

První část práce se zabývá vznikem rušivého světla a jeho potencionálními účinky. Dál jsou zde popsány normativní požadavky na omezení rušivého světla.

V další části jsou popsány zdroje rušivého světla. Rušivé světlo způsobují následující zdroje.

- Světelný tok vycházející ze svítidel VO
- Světelný tok z oken i domácností
- Světelný tok reklamních tabulí
- Venkovní osvětlení průmyslových, nákupních a zábavných center a sportovišť

V současné době je kladen velký důraz na úsporu a co nejefektivnější využití těchto zdrojů. Vliv na velikost rušivého světla mají i atmosférické podmínky (zatažená obloha, mlha, sněžení, déšť) a obsah prachových částic ve vzduchu (smog).

Třetí kapitola obsahuje možnosti měření a vyhodnocení rušivého světla od těch nejjednodušších, jež nekladou prakticky žádné nároky na pozorovací techniku a jsou založeny jen na určitých znalostech a zkušenostech pozorovatele, až po metody vyžadující použití optických systémů se CCD kamerou.

V praktické části je namodelovaná obec Libivá nacházející se v Olomouckém kraji poblíž Mohelnice. Cílem je využití kulové sítě výpočetních bodů pro modelování vyzařování světelného toku jdoucího do horního poloprostoru z osvětlovacích soustav veřejného osvětlení. Nejprve jsou osvětlovací soustava veřejného osvětlení osazena vysokotlakými sodíkovými výbojkami a poté LED svítidly. V závěru je provedeno srovnání těchto dvou osvětlovacích soustav z hlediska příkonů a vyzářeného světelného toku do horního poloprostoru.

1 Rušivé světlo

V dnešní době je rušivé světlo velmi diskutovaným tématem. V hodně zdrojích je užít výraz světelné znečištění, což je doslovný překlad z anglického výrazu "light pollution". Slovo znečištění znamená, že nežádoucí látka způsobí znečištění okolního prostředí a i po odstranění znečišťujícího prvku je vliv znečišťující látky patrný. U světla tomu tak ale není. Jakmile přestane působit zdroj rušivého světla, přestane existovat i rušivé světlo.

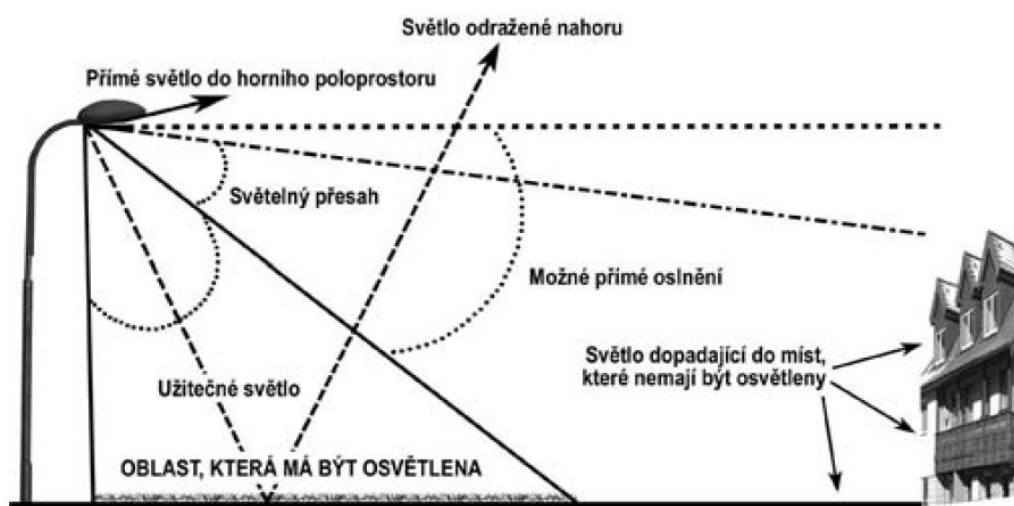
Světlo je pouhým indikátorem existence atmosféry a jejího skutečného znečištění, nikoliv znečišťovatelem ovzduší. V ovzduší částice světlo rozptylují, a proto se zvětšuje závojevý jas oblohy. Umělé osvětlení (přímé nebo odražené) může v místech výskytu fauny a flóry narušit přirozený noční stav a ohrozit jejich zdravý vývoj. Rušivé světlo, které vniká do oken bytových či rodinných domů, může narušovat spánek obyvatel.

1.1 Rozdělení rušivého světla

Rušivé světlo obecně definujeme jako rozptýlené elektromagnetické záření ve viditelné oblasti šířící se ve venkovním prostoru, které je nežádoucí. Toto světlo je produkováno umělými světelnými zdroji.

Rozptýlené světlo (nadměrné, parazitní) je takové, které nedopadá na osvětlovanou oblast, ale mimo a způsobuje tím nežádoucí účinky, jako jsou:

- Oslnivé světlo v různých formách
- Závojevý jas oblohy
- Světelný přesah
- Podíl horního světla ULR [9]



Obr. 1.1: Vznik různých forem rušivého světla venkovního osvětlení [10]

Obr. 1.1 popisuje vyzářený světelný tok ze svítidla veřejného osvětlení, který se podílí na osvětlení místa zrakového úkolu a na vzniku rušivého světla.

1.2 Oslnivé světlo

Abychom rozpoznali předměty v zorném poli, je potřeba, aby tyto předměty měly odlišné jasy, čímž vynikne jejich struktura a prostorová kompozice. Rozhraní se může vytvořit na styku ploch různých jasů. Možnost zpozorování předmětu je dána rozdílem jasu předmětu kritického detailu L_a a jasu bezprostředního okolí L_b . Kontrast jasu potom udává, za předpokladu rovnoměrného jasu kritického detailu i bezprostředního okolí, stupeň rozeznatelnosti:[1]

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{L_b} \quad [-] \quad (1.1)$$

Nepříznivý stav zraku (oslnění) může vzniknout, pokud je kontrast jasu nebo jas samotný vyšší, než na jaký je zrakový orgán adaptován. Důvodem oslnění může být chybně nasměrované nebo předimenzované svítidlo. Oslnění ruší zrakovou pohodu, zhoršuje nebo dokonce znemožňuje vidění, zvyšuje únavu, může mít za následek úrazy a v krajní situaci může poškodit zrakový orgán. [1]

1.2.1 Rozdělení oslnivého světla

Oslnivé světlo rozdělujeme do 4 skupin:

- **Absolutní oslnění.** Příčinou vzniku absolutního oslnění je vysoký jas. Při osvětlení ve dne jsou to jasy vyšší než $200\,000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, při umělém osvětlení jsou to jasy vyšší než $3000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Okolo $1000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ oslňují jasy v tmavém prostředí. Oslnění má za příčinu dočasnou neschopnost vidění.
- **Adaptační oslnění.** Je způsobeno nečekanou změnou adaptačního jasu. Adaptační oslnění nastává při přechodu z tmavého prostředí do světlejšího. Změny jasu nesmí být větší než 1:10.
- **Relativní oslnění.** Nastává při překročení meze adaptability v oblasti kontrastní citlivosti. Relativní oslnění vzniká v prostředí, kde je jas zdrojů o hodně vyšší, než jas adaptační nebo při nesprávném rozložení jasů v zorném poli.
- **Závojevé oslnění.** Je způsobeno vyšším jasnem rozptýlného prostředí, jenž se vyskytuje před pozorovaným předmětem. Pro venkovní svítidla spínaná fotobuňkou je závojevé oslnění typické. Zrakový orgán se adaptuje na vysoký jas a není vidět za tuto závojevou bariéru. S často měnícími se světelnými zdroji jsou konfrontováni také řidiči. Jejich zrakový orgán se snaží adaptovat na světlejší zdroje a schopnost vidět tmavé pozadí je snížena. [11]

Opakem k oslnění je jev siluetový. Zrakový orgán se snaží rozpoznat tmavý předmět proti jasnému okolí. Zrak nerozezná málo osvětlený předmět, protože je přizpůsoben vysokému jasu.

Dle stupně působení na zrakový orgán se oslnění dělí na dvě kategorie:

- **Psychologické oslnění** – světelný zdroj odpoutává pozornost pozorovatele od jeho zrakového úkolu. To má za následek vznik nepohody a únavy. Nezpůsobují však snížení zrakových schopností.
- **Fyziologické oslnění** – zhoršení schopnosti uživatele vykonávat zrakový úkol. Snižuje se kontrastní citlivost a zraková ostrost. Vyvolává měřitelné změny zrakových funkcí. [12]

1.3 Závojevý jas oblohy

Příčinou vzniku závojevého jasu je světelný tok vyzařovaný primárně z umělých světelných zdrojů. To je ze svítidel veřejného osvětlení, ale i sekundárně odrazem od povrchů, na nichž dochází k odrazu světelného toku. Světelný tok se potom šíří atmosférou. [1]

Vlastnosti mající vliv na prostupnost světelného záření atmosférou jsou dány chemickým složením atmosféry, jako jsou prachové částice, vodní páry a aerosoly tvoří bariéru prostupujícímu světlu. Jakákoliv taková mikročástice světelný tok částečně odrazí, částečně pohltí a částečně projde jejím povrchem. Pro celkový světelný tok tedy platí:[1]

$$\Phi = \Phi_{\rho} + \Phi_{\alpha} + \Phi_{\tau} \quad [\text{lm}] \quad (1.2)$$

Kde:

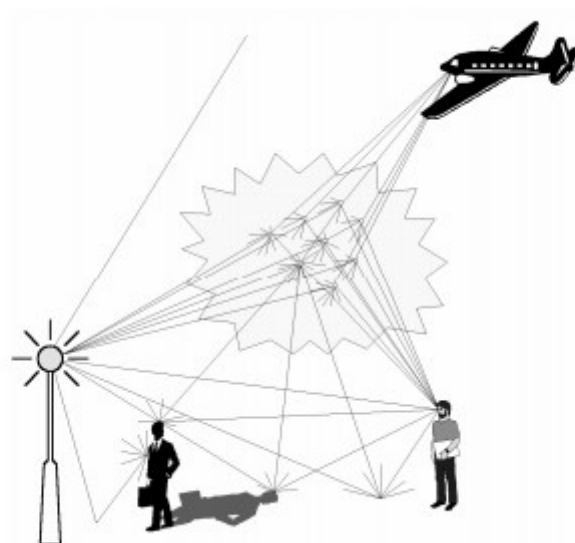
Φ - celkový světelný tok (lm)

Φ_{ρ} - odražený světelný tok (lm)

Φ_{α} - pohlcený světelný tok (lm)

Φ_{τ} – propuštěný světelný tok (lm)

Podstatná je hlavně odražená složka světelného toku, která se vrací zpět směrem k pozorovateli nebo opět naráží na zmíněné bariéry a je znovu rozptylována, pohlcována a propuštěna. Interakce světla a prostředí je výsledkem projevující se vznikem závojevého jasu. Kvůli zvýšení jasu oblohy klesá kontrast mezi jasy objektů na obloze a jasnem oblohy, který zvětšuje adaptační úroveň zrakového orgánu. Tím se snižuje pozorovatelnost objektů za touto interakcí, které jsou zájmem astronomického pozorování. Závojevý jas oblohy se kvůli svému významu v astronomii stává důležitým tématem rušivého světla. [1]



Obr. 1.2: Rozptyl světla na částicích a vznik závojového jasů [13]

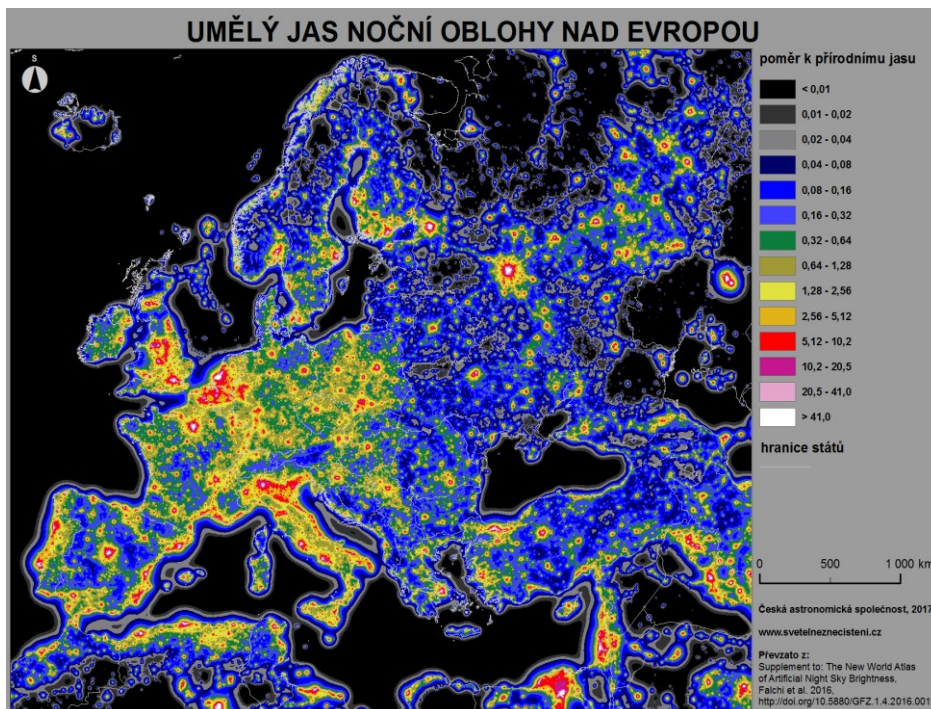
- **Umělý jas noční oblohy nad Českou republikou**



Obr. 1.3: Umělý jas noční oblohy nad ČR [14]

V České republice je vidět, že největší závojový jas se nachází nad městy, které mají největší hustotu osídlení jako je Praha, Ostrava, Olomouc, Brno či Plzeň.

- Umělý jas noční oblohy nad Evropou



Obr. 1.4: Umělý jas noční oblohy nad Evropou [14]

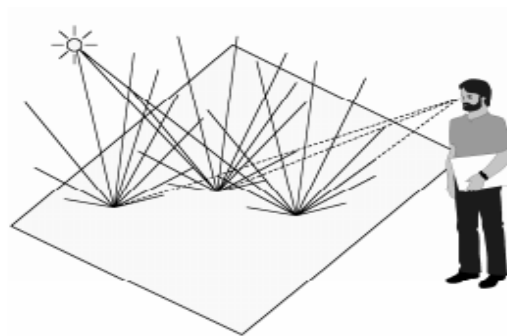
Závojevý jas je nejvíce vidět nad oblastmi s hustou aglomerací. Obr. 1.4 ukazuje hustotu světelných zdrojů v Evropě. Nejvýraznější jasy vidíme ve střední Evropě a západních zemích jako jsou Velká Británie, Nizozemí nebo Belgie.

1.4 Optické zákony, vznik závojevého jasu

Světelné záření prostupující atmosférou reaguje s tímto prostředím na základě třech optických zákonů a to o odrazu, prostupu a absorpci.

1.4.1 Odraz světelného záření

Odraz nastává, když se vrací záření od povrchu nebo prostředí beze změny kmitočtu jeho monochromatických složek. Difúzní povrch rozptyluje dopadající světlo do různých směrů, což přispívá k rovnoměrnosti světla v prostoru. Každý element povrchu odráží část světla k oku. Difúzní odraz nastává na částicích rozptýlených v atmosféře nebo na strukturovaném povrchu. [11]



Obr. 1.5: Difúzí povrch rozptylující světlo všemi směry [13]

- **Rovnoměrně rozptylný, difúzní odraz**

Je zřejmý u Lambertova zářiče. Při něm dochází k rovnoměrnému rozptylu odraženého záření do celého prostoru. U difúzního odrazu dosahuje svítivost maximální hodnoty v kolmém směru (I_0). (viz obr. 1.6). Pod jinými úhly se svítivost spočítá podle kosinového zákona.

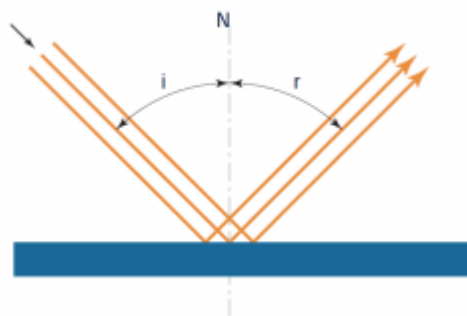
$$I_\gamma = I_0 \cdot \cos\gamma \quad [\text{cd}] \quad (1.3)$$



Obr. 1.6: Difúzní odraz (Lambertův zářič) [15]

- **Zrcadlový odraz**

Na obr. 1.7 je vidět zrcadlový odraz, který odráží světlo v každém bodě jen jedním směrem a nastává jen na hladkých plochách. Úhel od normály plochy k dopadajícímu paprsku záření je roven úhlu odrazu. Odražený paprsek leží v rovině dopadu a je odkloněn od normály na protilehlou stranu od normály. [11]



Obr. 1.7: Ideální (zrcadlový odraz) [15]

- **Smíšený odraz**

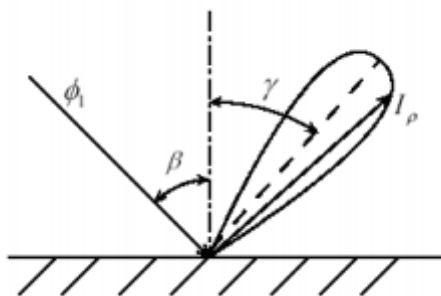
V praxi materiály vykazují většinou smíšený odraz. Je to částečně difúzní a částečně zrcadlový odraz. Zrcadla obsahují v praxi i malou část rozptylujícího záření a na druhou stranu matné povrchy pro rozptyl vykazují zrcadlový odraz v jistém malém rozsahu úhlů. V praktických výpočtech se pro zjednodušení počítá s ideálními odraznými a rozptylujícími vlastnostmi materiálů. [1]



Obr. 1.8: Smíšený odraz [15]

- **Směrově difúzní odraz**

Má převážnou složku odraženého záření v některém směru.

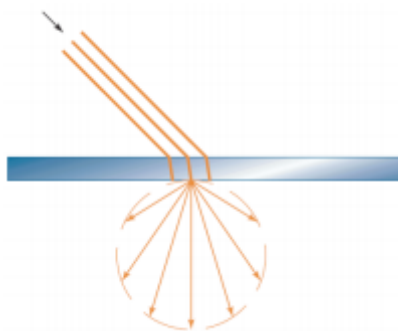


Obr. 1.9: Směrově rozptýlený odraz [16]

1.4.2 Prostup světelného záření

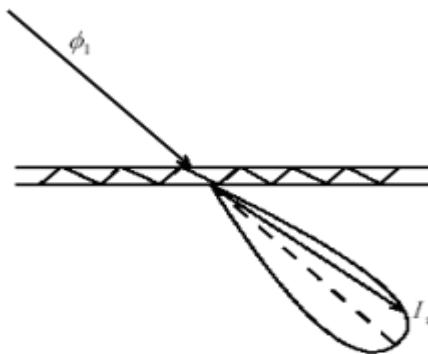
Prostup světelného záření prostředím se děje bez změny kmitočtu jeho monochromatických složek. Prostup může být přímý nebo rozptylový (difúzní). K difúznímu rozptylu dochází u dokonale rozptylujících materiálů. Stejně jako v případě difúzního odrazu, tak i při prostupu je maximální svítivost I_0 v kolmém směru. Podle prostorového rozložení světelného toku rozdělujeme rozptylový prostup záření na:

- **Rovnoměrně rozptylný** – vystupující záření je prostorově stejně rozděleno pro všechny směry, do kterých je záření vyzařováno.



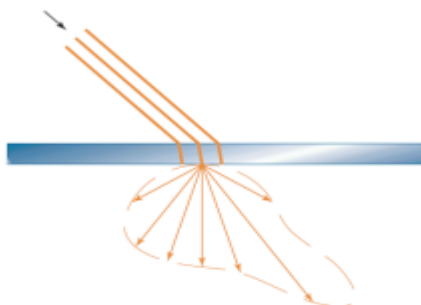
Obr. 1.10: Difúzní prostup světelného záření [15]

- **Směrově rozptylný** – vystupující záření převažuje v určitém směru.



Obr. 1.11: Směrově rozptylný prostup [16]

- **Smíšený prostup** – ke smíšenému prostupu dochází v praxi. Je složen z difúzní části a přímého prostupu.



Obr. 1.12: Smíšený prostup [15]

1.4.3 Absorpce světelného záření

Na hmotném prostředí vzniká pohlcení světelného záření, toto záření se transformuje na tepelnou energii. Absorpce je dána podílem toku pohlceného prostředím a toku dopadajícího. [16]

Činitel absorpce α je doplňujícím činitelem v součtu činitelů odrazu a prostupu tak, aby byla zachována energetická bilance světelného toku. Viz rovnice (1.2)

$$\alpha = 1 - \rho - \tau \quad [-] \quad (1.4)$$

Vyjádřenou rovnici světelných toků dělíme celkovým tokem Φ .

$$\frac{\Phi_\rho}{\Phi} + \frac{\Phi_\tau}{\Phi} + \frac{\Phi_\alpha}{\Phi} = \rho + \tau + \alpha = 1$$

Pro neprůsvitné částice platí $\rho + \alpha = 1$. Pro tělesa pohlcující veškeré záření platí $\alpha = 1$.

1.5 Světelný přesah

Světelný přesah je nežádoucí světlo distribuované do neurčených prostorů. Příkladem takového vyzařování je světlo ze svítidel veřejného osvětlení dopadající do bytových nebo rodinných domů nebo světlo osvětlující sousední pozemky. Toto světlo může narušovat soukromí obyvatel. Projev světelného přesahu je zvýšená vertikální osvětlenost (E_v) svislých ploch. Světelný přesah jasně zvyšuje energetické ztráty, protože se svítí tam, kde nemá a nemusí. [1]



Obr. 1.13: Příklad světelného přesahu [17]

1.6 Podíl horního světla ULR

ULR je podíl světelného toku vyzařeného přímo do horního poloprostoru k celkovému světelnému toku vyzařujícím ze svítidla.

Přímá složka a složka odražená od terénu a objektů v okolí tvoří celkový světelný tok, který se šíří do horního poloprostoru a zvyšuje tak závojevý jas oblohy. [1]

$$ULR = \frac{ULOR}{ULOR + DLOR} \quad [\%] \quad (1.5)$$

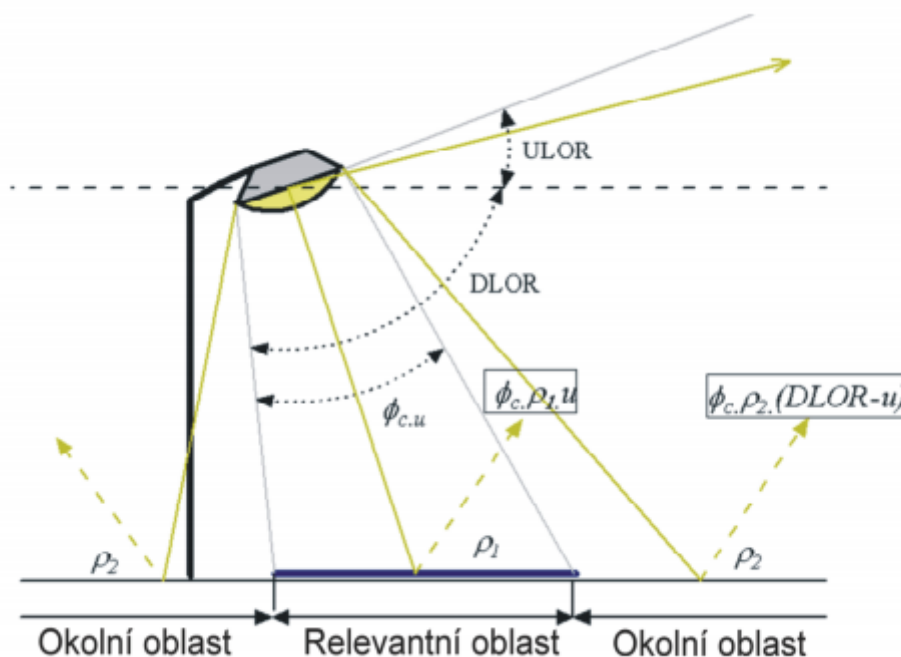
Kde:

ULR – poměrný přímý světelný tok vyzařovaný do horního poloprostoru (%)

ULOR – světelný tok vyzařovaný přímo ze svítidla do horního poloprostoru (lm)

DLOR – světelný tok odražený od povrchů okolních oblastí (lm)

ULOR + DLOR – celkový světelný tok vyzařovaný do horního poloprostoru (lm)



Obr. 1.14: Přímá a odražená složka světelného toku [1]

U výrobce je možno získat parametry svítidel jako je účinnost, ULOR a DLOR. Definování odraznosti povrchu v daném místě se výrazně promítá do přesnosti výpočtu. Např. povrch vozovky je standardizován třídami R1, R2, R3 s činitelem odrazu $\rho = 0,07$ až $\rho = 0,10$ [18]

1.7 Normativní požadavky na rušivé světlo

Pro ochranu a zlepšení nočního prostředí jsou v normě ČSN EN 12464-2 uvedeny mezní hodnoty rušivého světla. Limity rušivého světla jsou rozděleny do dvou skupin:

- Limity rušivého světla ve venkovních osvětlovacích soustavách k minimalizaci problémů pro osoby, floru a faunu, viz tabulka 1.1
- Limity rušivého světla pro uživatele cest, viz tabulka 1.2

Z hlediska velikosti rušivého světla v závislosti na velikosti aglomerace a atmosférických podmínkách můžeme rušivé světlo zatřídit do několika skupin podle normy ČSN EN 12464-2:

Tab. 1.1: Limitní hodnoty světelně technických veličin ve venkovním osvětlení [6]

Zóna (charakteristika) prostředí	Světlo na objektech		Svítivost svítidla		Světlo nahoru	Jas	
	E_v (lx)		I (cd)		ULR (%)	L_b (cd·m ⁻²)	L_s (cd·m ⁻²)
	mimo noční klid ^{a)}	v době nočního klidu	mimo noční klid	v době nočního klidu		fasády budov	značky
E1	2	0	2500	0	0	0	50
E2	5	1	7500	500	5	5	400
E3	10	2	10000	1000	15	10	800
E4	25	5	25000	2500	25	25	1 000
Kde: E_v největší hodnota svislé (vertikální) osvětlenosti na objektech (lx); I svítivost každého světelného zdroje v potenciálně rušivém směru (cd); ULR podíl (poměrná část) světelného toku svítidla (svítidel) vyzařovaného nad horizont v jeho (jejich) pracovní poloze a umístění (%); L_b největší průměrný jas fasády budov (cd·m ⁻²); L_s největší průměrný jas značek (cd·m ⁻²). ^{a)} V případě kdy se neuplatňuje noční omezení, větší hodnoty nesmí být překročeny a menším hodnotám se má dát přednost.							

- E1 představuje skutečně tmavé prostory jako národní parky a chráněná území
- E2 představuje oblasti s velmi malým jasnem jako průmyslové a obytné venkovské zóny
- E3 představuje středně světlé oblasti jako průmyslová a obytná předměstí
- E4 představuje velmi světlé oblasti jako městská centra a obchodní zóny

Vedle sebe se mohou vyskytovat různé zóny a to hlavně ve větších zkoumaných oblastech. Pokud tomu tak je environmentální zóny by neměly přecházet více jak o jeden stupeň. Také hranice mezi zónami nejsou skokové, ale postupné.

Tab. 1.2: Největší hodnoty prahových přírůstků od jiných než uličních svítidel [19]

Světelně-technické parametry	Třída osvětlení pozemní komunikace ^{a)}			
	osvětlení jiné než uliční	ME5	ME4 / ME3	ME2 / ME1
Prahový přírůstek (TI) ^{b) c) d)}	15 % za předpokladu, že adaptační jas je 0,1 cd·m ⁻²	15 % za předpokladu, že adaptační jas je 1 cd·m ⁻²	15 % za předpokladu, že adaptační jas je 2 cd·m ⁻²	15 % za předpokladu, že adaptační jas je 5 cd·m ⁻²
^{a)} Třídy osvětlení podle EN 13201-2. ^{b)} Výpočet TI podle EN 13201-3. ^{c)} Tyto limity se použijí v případě, že uživatelé dopravního systému jsou vystaveni omezení viditelnosti základních informací. Hodnoty platí pro relevantní polohu a pro směr pohledu na trasu dopravy. ^{d)} V tabulce 5.2 CIE 150:2003 jsou uvedeny příslušné hodnoty závoje jasů L_v .				

1.7.1 Environmentální zóny

Mezinárodní komise pro osvětlování vytvořila Směrnici pro minimalizaci záře oblohy CIE 126 – 1997 (Guidelines for minimizing sky glow), která vznikla ve spolupráci s Mezinárodní astronomickou unií (International astronomical union, IAU) a za spoluúčasti Mezinárodní společnosti pro temné nebe (International dark – sky association). Tato směrnice je technickou zprávou, která se zabývá teoretickými aspekty záře oblohy a v níž jsou zformovány všeobecné zásady pro omezení záře oblohy. Jsou zde uvedeny limitní hodnoty podílu světelného toku svítidel do horního poloprostoru pro jednotlivé skupiny zón prostředí z hlediska potřeb astronomických pozorování. [20] Zóny E1 - E4 jsou uvedeny výše v tabulce 1.1.

Rušivé světlo v dané zóně nezávisí jen na množství „znečišťujícího“ světelného toku vznikajícím ve své vlastní zóně, závisí také na produkci světelného znečištění v sousedních zónách. Proto jsou navrženy vzdálenosti hranic sousedních zón od referenčního bodu.

Tab. 1.3: Minimální délky mezi zónami vztažené k referenčnímu bodu E1[20]

Třída zóny referenčního bodu	Minimální vzdálenost hranic sousedních zón podle tříd [km]		
	E1 - E2	E2 - E3	E3 - E4
E1	1	10	100
E2		1	10
E3			1
E4	žádné omezení		

2 Zdroje rušivého světla

Zdrojem rušivého světla jsou svítidla a světlomety v osvětlovacích soustavách, které se používají pro:

2.1 Osvětlení pozemních komunikací

Osvětlení pozemních komunikací zahrnuje osvětlení v městských aglomeracích (přechody pro chodce, cyklistické stezky, chodníky, ulice), osvětlení podstatných dopravních uzlů a dálkových komunikací, osvětlení dopravních terminálů (vlakových a autobusových nádraží, přístavy, překladiště apod.) a osvětlení tunelů či podjezdů. Je očividně nejrozsáhlejší formou venkovního osvětlení a má tedy velký podíl na vznik rušivého světla. [1]



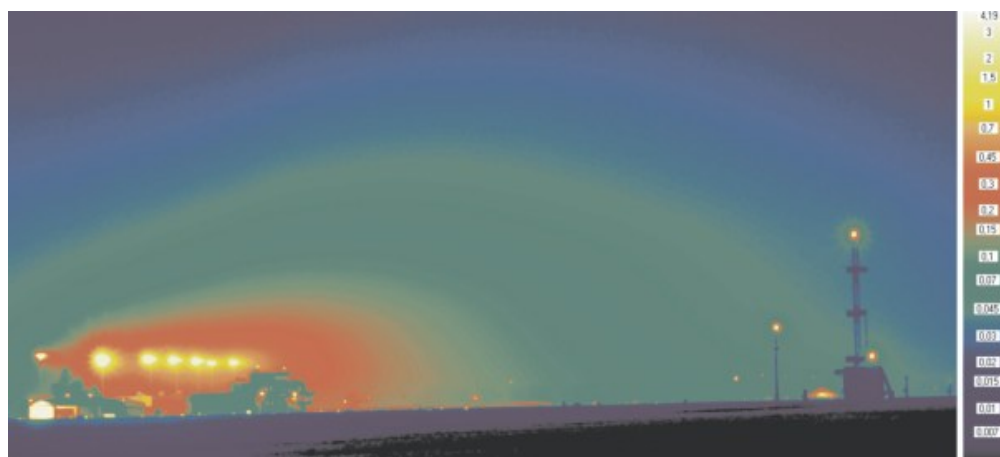
Obr. 2.1: Veřejné osvětlení se špatně zvolenou charakteristikou vyzařování [1]

Návrh osvětlení komunikací se řídí několika pravidly. Jedním z nich je, že svítidla veřejného osvětlení mají mít takovou charakteristiku vyzařování, aby světelný tok ze svítidla dopadal na požadovanou plochu. U soustavy svítidel na obr. 2.1 jsou svítidla zvoleny s kulovou vyzařovací charakteristikou, a tudíž je světelný tok vyzařován i přímo do horního poloprostoru, to má za následek zvýšení rušivého světla a taky snížení účinnosti osvětlovací soustavy. [2]

2.2 Osvětlení letišť

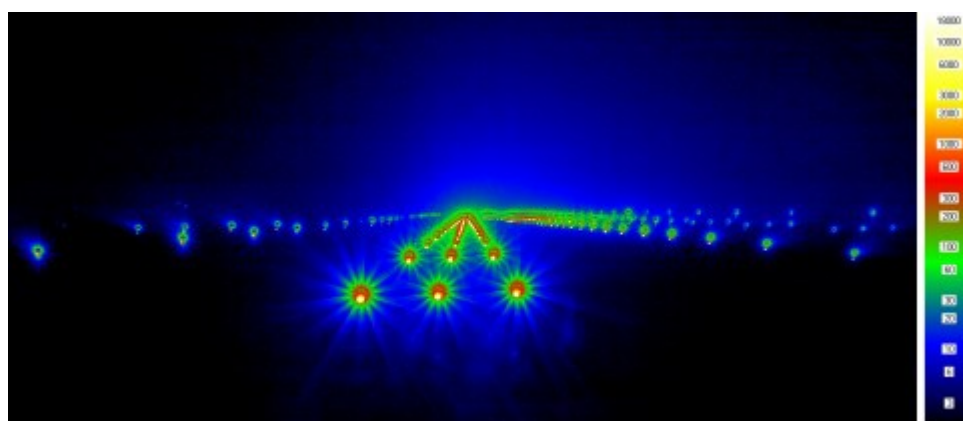
Osvětlení letišť je úmyslně odděleno od pozemních komunikací, protože jsou zde kladeny z důvodu bezpečnosti letového provozu, zvýšené nároky na omezování rušivého světla, hlavně oslnění. Od osvětlení pozemních komunikací se odlišuje tím, že svítidla mohou být přímo určena ke svícení do horního poloprostoru. [1]

Na letištích je možno narazit na mnoho kombinací osvětlovací techniky, kdy kvalitně hlavně musí být osvětleny přistávací plochy, které nemusí být z pohledu země patrné. Oproti tomu je vysoce patrné osvětlení hal, hangárů a přilehlých parkovišť a to díky vysoké frekventovanosti a vzhledem k perifernosti letišť září do širokého okolí. [14]



Obr. 2.2: Nevhodně navržené osvětlení odbavovací plochy na letišti pomocí svítidel s nesymetrickou vyzařovací charakteristikou [1]

Při provozu letiště v noci je podstatné dobře osvětlit přistávací dráhu, tak aby byla bezpečná pro noční přistávání letadel. S nočním provozem je rovněž spojeno osvětlování odbavovacích ploch. Z obrázku 2.1 je zřejmé, že osvětlení odbavovací plochy je nastaveno špatně. Z jasové mapy jde vidět, že nejvíce světelného toku osvětlovací soustavy je směřována vodorovně a neosvětluje požadovaný prostor odbavovací plochy, ale vzdálené okolí. Svítidla zvolená s asymetrickou vyzařovací charakteristikou umožňují nasměrování světelného toku na požadovanou oblast a snížit světelný tok vyzařovaný přímo do horního poloprostoru. [2]



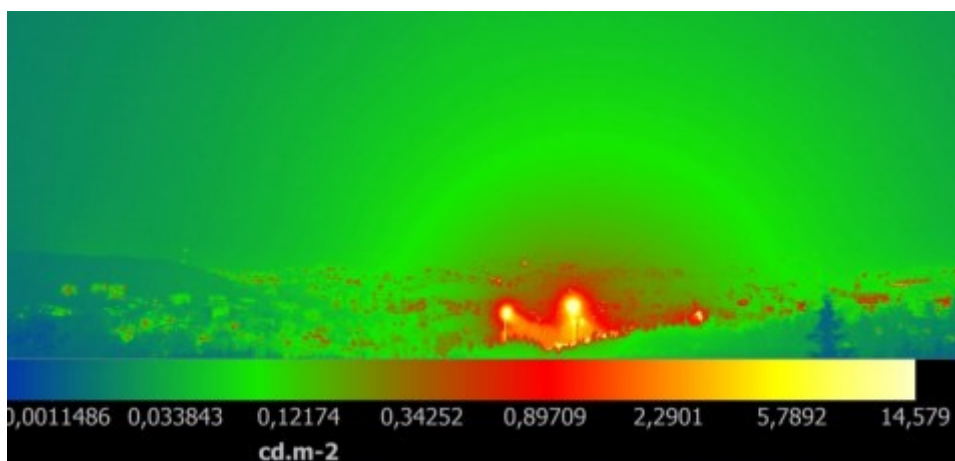
Obr. 2.3: Osvětlení přistávací plochy pomocí zabudovaných [2]

Světelný tok návěstidel směřuje pod určitým úhlem přímo do horního poloprostoru tak, aby letadla přistávala v noci bezpečně. Takto vyzařující rušivé světlo jak můžeme vidět na obrázku 2.3 má vliv hlavně na blízkou okolní faunu a flóru, ovšem jen po dobu nezbytně nutnou k přistání letadel. [2]

2.3 Osvětlení venkovních sportovišť

Je specifické použitím svítidel s výkonnými zdroji světla pro dostatečné osvětlení velkých prostorů a ploch. Pro vysílání přímého přenosu je nutno dostatečně osvětlit hrací plochu a současně omezit oslnění hráčů. Hodnoty oslnění se počítají pro směry pohledů a dohodnutá postavení pozorovatele. K osvětlení sportovišť se používají vysoké stožáry, jak lze vidět na obr. 2.4. Svítidla na stožárech mnohonásobně přesahují svým jasnem svítidla veřejného osvětlení a způsobují mnohem větší jas noční oblohy. [4]

I když se u osvětlení venkovních sportovišť jedná o přechodné osvětlení, zařazuje se mezi důležitý zdroj rušivého světla s vysokou intenzitou. Hodně sportovišť se snaží reflektory směřovat, ale většina z nich pořád svítí pod velkými úhly a do všech směrů. Omezit rušivé světlo by bylo možné za předpokladu, pokud by osvětlení svítlo pouze po dobu sportu, bylo by omezeno svícení do horního poloprostoru nebo pomocí clon. [14]

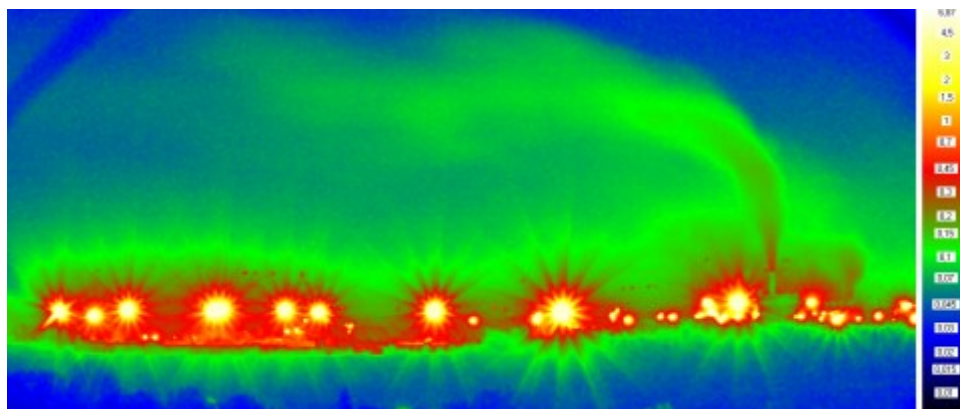


Obr. 2.4: Jasová mapa s osvětlením stadionu a zvýšeným jasnem oblohy nad stadionem [1]

Při pohledu z místa nad úrovní svítidel osvětlení stadionu lze vidět i jas světelných zdrojů. Na obr. 2.4 je jasová mapa, kde je uvedena upravená paleta s maximální hodnotou $14,6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ pro lepší znázornění jasu noční oblohy. Světelné zdroje v tomto případě dosahují mnohem vyšších hodnot, které již není možné z pořízených snímků korektně vyhodnotit. Toto je způsobeno delším časem expozice snímků pro zachycení jasů noční oblohy. [2]

2.4 Osvětlení venkovních pracovišť

Velký výběr svítidel s vysokými výkony dovoluje osvětlení rozsáhlých ploch. Tuto příležitost využívají průmyslové závody pro osvětlování venkovních prostor nejenom pro nepřetržitou výrobu, ale i pro zaručení bezpečnosti a ochrany. Jde o osvětlení velkých výrobních závodů a průmyslových zón. Na obr. 2.5 lze vidět vliv látek nacházejících se ve vzduchu. [6]



Obr. 2.5: Obloha nad jasovou mapou průmyslové zóny[1]

Průmyslové zóny i venkovní areály, kvůli své velikosti, množství budov a komunikací, jsou z bezpečnostního důvodu v noci osvětlována nejvýkonnějšími zdroji. Z velké části svítidla svítí tam, kam nemají, tedy svítí do horního poloprostoru, oslňují již z dálky a ani ostraha co má na starost hlídání objektu dobře nevidí v protisvětle. [7]

2.5 Architektonické osvětlení

Osvětlení významných památek a budov, různých monumentů a osvětlení parků a zahrad může být také jako zdroj rušivého světla. Zde se často používají svítidla, které svítí do horního poloprostoru, které mají velký podíl na závojevém jasu oblohy.[8]



Obr. 2.6: Jasová mapa osvětleného historického náměstí a přilehlých budov [2]

Na obr. 2.6 lze vidět osvětlení historického náměstí v centru města. Z jasové mapy je zřejmé, že jas je mnoho násobně vyšší na stěnách historických budov na náměstí, než na okolních domech.

2.6 Reklamní osvětlení

Jde o osvětlení billboardů, reklamních ploch, směrových ukazatelů obchodních center, osvětlení čerpacích stanic apod. Nepřiměřeně vysoká hladina osvětlenosti těchto ploch je hlavním problémem reklamního osvětlení. [1]



Obr. 2.7: Jasová mapa s reklamním osvětlením na obchodním domě [21]

Reklamy umístěné na obchodním domě mají velký vliv na odražený světelný tok. Jejich jas je mnohonásobně vyšší než jas okolního prostředí. Světelný tok vycházející z reklam směřuje i přímo do horního poloprostoru. [2]

Reklamní osvětlení by mělo svítit v době, kdy může někoho upoutat a ne během celé noci. Světelný tok z reklam by neměl směřovat do okolních bytů. [14]

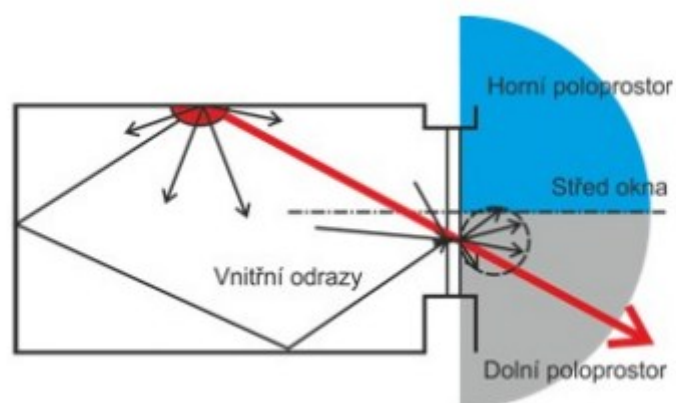
Kolem rychlostních komunikací jsou mnohdy nasvícené billboardy, kdy ale svítidla reklamní plochu osvětlují ze zdola nahoru. To tvoří nad billboardem světelný závoj a to vede ke světelnému znečištění v okolí dálnic. Zřizovatelé se snaží používat co nejsilnější osvětlení, aby zvětšili pravděpodobnost, že si řidič billboardu všimne. Nápravou je osvětlování ze shora dolů, které je z technického hlediska možné a můžeme se s takovým případem setkat. [14]

2.7 Vnitřní osvětlení

Opomenout by se nemělo rušivé světlo vycházející z oken domácností. Světelný tok zářící oknem do horního poloprostoru záleží na zdroji světla, jeho pozici v místnosti a na vlastnostech okna (včetně žaluzií, závěsů, apod.) [1] Na jasové mapě, která je znázorněna na obrázku 2.8, lze vidět různé jasy svítících oken. Největší hodnoty jasů svítících oken bez závěsů se vyskytují kolem $10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Naproti tomu, minimální jasy u oken se žaluziemi, jsou 10 x menší. [2]



Obr. 2.8: Jasová analýza panelového domu [1]



Obr. 2.9: Světelný tok vyzařovaný ze svítidla z oken domácnosti do horního poloprostoru [1]

Světelný tok vyzařovaný ze svítidla uvnitř bytového prostoru je znázorněn na obr. 2.9. Přímý světelný tok vyzařuje ze svítidla do dolního poloprostoru, ale dochází k rovnoměrnému rozptylu na rozhraní okna a část světleného toku ovlivňuje horní poloprostor a zvyšuje velikost rušivého světla. K rušivému světlu přispívá přímý světelný tok, ale i odražený světelný tok v místnosti vycházející ven z okna. [2]

Největší rušivé světlo, které vychází z oken domácnosti, se vyskytuje u moderních skleněných budov, ze kterých světlo vyzařuje do všech směrů a v nějakých případech bývají vnitřní prostory osvětlené během celé noci jako forma nasvícení budovy. Toto záření může působit rušivě pro obyvatele sousedních objektů a je velmi nevhodné. [27]

3 Možnosti měření a vyhodnocení rušivého světla

Měření účinků rušivého světla může být v některých případech hodně náročné, v jiných zase velmi jednoduché. Rušivé světlo dopadající do oken bytových domů není problém změřit. Obvykle není problém změřit množství světla dopadajícího do nežádoucích míst. Problém ovšem nastává při vyhodnocení oslnění. Měření nežádoucích vlivů umělého osvětlení na noční prostředí, tedy zvýšení závoje jasů oblohy, nebo měření nežádoucího zvýšení osvětlenosti noční krajiny není vůbec snadné.

Vliv umělého osvětlení na noční oblohu lze vyhodnotit několika způsoby.

3.1 Hodnocení závoje jasů oblohy

Měření a hodnocení lze provádět jednoduše, kde se nekladou žádné nároky na pozorovací techniku a jsou založeny jen na určitých znalostech a zkušenostech pozorovatele až po metody vyžadující použití optických systémů s CCD kamerou.

3.1.1 Vizuální metoda

Za nejjednodušší metodu je zřejmě považovat stanovení mezní hvězdné velikosti. K měření používá pozorovatel pouze svůj zrak, případně dalekohled.

Na obloze se zvolí patřičná oblast, která je vymezena čtyřmi jasnými a snadno objevitelnými hvězdami. Měření musí být provedeno za bezoblačné oblohy s možností opakování měření v jiných lokalitách. Spočítají se všechny viditelné hvězdy v dané oblasti a ze známých hvězdných velikostí lze odvodit mezní hvězdnou velikost v dané lokalitě při určitých pozorovacích podmínkách. Tato metoda je velice subjektivní, protože záleží i na kvalitě zraku pozorovatele. Přesnější výsledky může poskytnout, zúčastní-li se pozorování více pozorovatelů. Metoda se může označit za orientační, umožňující posoudit, zda v té či jiné lokalitě jsou vhodné podmínky pro astronomická pozorování. [23]

3.1.2 Fotografická metoda

Jinou metodou vyhodnocení zvýšeného závoje jasů je fotografování s klasickým fotoaparátem. Tuto metodu lze již zařadit mezi objektivní. Existuje standart, který umožňuje porovnávat jednotlivé výsledky. Používá se barevný inverzní film s citlivostí ASA 400, objektiv o ohniskové vzdálenosti 50 až 55 mm s clonou nastavenou na hodnotu 4. Exponuje se po dobu osmdesáti sekund. V případě fotografie závisí konečný výsledek na vlastnostech fotoaparátu a jeho nastavení. Ze zjištěného rozdílu optické hustoty obrazu pozadí a drah hvězd známých hvězdných velikostí na filmu lze odvodit velikost závoje jasů oblohy. I tato metoda je závislá na definované jasnosti hvězd a není ji možné použít při zatažené obloze. [23]

Výhodou této metody je celková technická nenáročnost a schopnost velice dobře postihnout charakter jasnosti oblohy na daném pozorovacím stanovišti.

Nevýhodou této metody měření je možnost ovlivnění náhodným světlem dopadajícím do pozorované oblasti nebo posun jiných hvězd v pozorované oblasti [23]

3.1.3 Měření CCD kamerou

Měření CCD kamerou může být speciálně prováděno jen kvůli stanovení jasnosti noční oblohy nebo je možno použít snímky pořízené za jiným účelem (hlavním účelem je pozorování proměnných hvězd nebo v případě standartních hvězdných polí je to určování atmosférické extinkce). Používá se pro záznam dlouhé sekvence snímání, které trvá i několik hodin.

Touto kamerou se měří nízké úrovně jasů z několika důvodů. Jedním z důvodů je vysoká citlivost kamery dosažená chlazeným CCD čipem. Další důvod je možnost vkládání různých optických filtrů před černobílý CCD snímač, což umožňuje optické přizpůsobení křivce citlivosti lidského oka V_λ pro fotopické vidění, ale také (při použití jiných filtrů) přizpůsobení mezopickému a skotopickému vidění. Třetí důvod je možnost měnit optiku a použít tzv. rybí oko ke snímání jasů celého horního poloprostoru. Poslední důvod použití tohoto snímače k vyhodnocování jasů je možnost automaticky ovládat a ukládat údaje do vyhodnocovacího softwaru. Pro vlastní měření jasů je nutné kameru připojit k počítači a použít spolu s optickým zařízením (dalekohled, objektiv, mikroskop a filtr) [25]



Obr. 3.1: Astronomická CCD kamera G2 – 4000 [25]

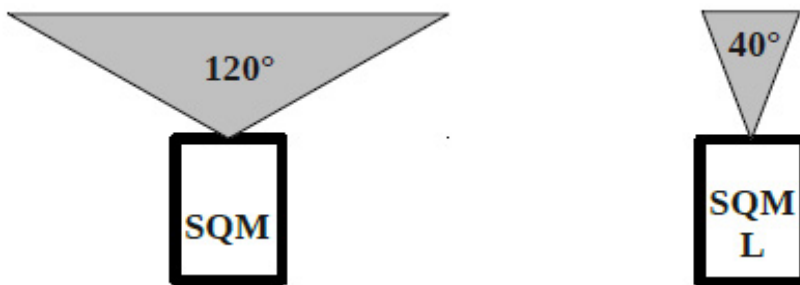
3.1.4 Měření pomocí SQM (Sky Quality Meter)

SQM v překladu znamená měřič kvality oblohy. V podstatě se však jedná o přístroj měření jasů tzv. jasoměr. V jeho jádru je citlivý čip, který zaznamenává, kolik světla přichází z oblasti, do které je SQM namířené (nemusí to být jen obloha) a na základě toho vypočítá jas této oblasti. Výsledky měření jsou v jednotkách MSA (magnituda na čtvereční úhlovou vteřinu), které se obvykle používají v astronomii. Stupnice magnitud je obrácená, proto platí, že čím je naměřená hodnota vyšší, tím je obloha tmavší. [28]



Obr. 3.2: Přístroj SQM – L od firmy UniHedron [28]

SQM má několik různých typů. Nejrozšířenější jsou základní SQM a SQM-L, které jsou vybaveny směrovou optikou. Odlišují se od sebe velikostí oblasti, ve které měří jas. SQM měří jas v širokém úhlu téměř 120° , kdežto SQM-L měří v užším úhlu asi 40° . Oba typy mají své výhody, ale i nevýhody. Širokým SQM jde najednou změřit jas podstatné části oblohy, ale je těžké zjistit ve kterém směru je obloha tmavší a ve kterém světlejší. Zatímco s úzkým SQM-L změříme najednou jen malou

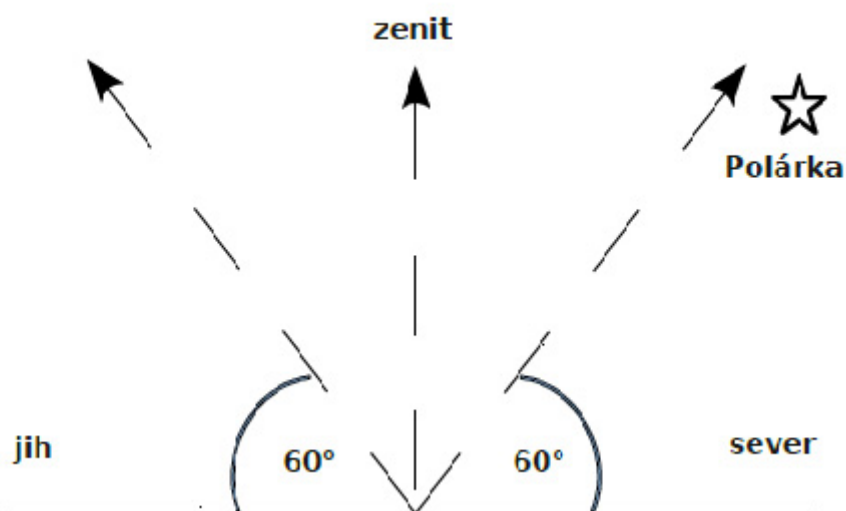


Obr. 3.2: Přístroj SQM měří v širším úhlu než SQM-L [28]

část oblohy, ale takto můžeme měřit v různých směrech a zjistit, kde je obloha tmavší a kde světlejší. Patřičným způsobem měření je možné pomocí SQM-L získat údaje, které mohou být porovnány s údaji ze základního SQM. [28]

Měření přístrojem SQM je poměrně jednoduché. Přístroj stačí namířit do zenitu a zmáčknout tlačítko. Přístroj začne na chvíli pípat a potom se naměřená hodnota objeví na displeji. Je doporučeno provádět několik měření za sebou v rychlém sledu a změřené hodnoty zaznamenat. Pár prvních hodnot je ovlivněno tím, že přístroj není zahřátý na provozní teplotu a proto je ignorujeme. Další hodnoty by se od sebe již neměly odlišovat o více než několik setin MSA. [28]

Měření s přístrojem SQM-L je skoro stejné. Rozdíl je jen v tom, že pro úplnou informaci o stavu oblohy je lepší změřit více míst na obloze. Doporučuje se provést měření v zenitu a ještě ve 4 světových stranách ve výšce 60° nad obzorem. Postup měření v každém směru je stejný jako u předešlého případu. Když se udělá průměr z takto změřených jasů, tak se získá hodnota, která je možná porovnat se základním SQM. [28]



Obr. 3.3: Měření s přístrojem SQM-L je vhodné provést v zenitu a výšce 60° na všechny světové strany [28]

Měření je nutno provádět na místech s dobrým rozhledem a tam kde ve výhledu na oblohu nepřekáží stromy, budovy nebo jiné překážky. Na přístroj během měření nesmí dopadat žádné světlo z okolních lamp, oken apod. Měření se provádí jen při jasném počasí, když je úplná tma a současně na obloze není Měsíc, který by měření nepříznivě ovlivňoval. [28]

3.2 Hodnocení světelného přesahu

Pro hodnocení světelného přesahu způsobujícího prostup světleného toku do oken budov existují doporučení limity osvětlenosti oken a maximální dovolené hodnoty jasů fasád budov. Níže jsou tyto limitní hodnoty uvedeny.

➤ Mezinárodní doporučení

Tab. 3.4: Limity rušivého světla [6]

Zóna (charakteristika) prostředí	Světlo na objektech		Svítivost svítidla		Světlo nahoru	Jas	
	E_v (lx)		I (cd)		ULR (%)	L_b (cd·m ⁻²)	L_s (cd·m ⁻²)
	mimo noční klid ^{a)}	v době nočního klidu	mimo noční klid	v době nočního klidu		fasády budov	značky
E1	2	0	2500	0	0	0	50
E2	5	1	7500	500	5	5	400
E3	10	2	10000	1000	15	10	800
E4	25	5	25000	2500	25	25	1 000
Kde: E_v největší hodnota svislé (vertikální) osvětlenosti na objektech (lx); I svítivost každého světelného zdroje v potenciálně rušivém směru (cd); ULR podíl (poměrná část) světelného toku svítidla (svítidel) vyzařovaného nad horizont v jeho (jejich) pracovní poloze a umístění (%); L_b největší průměrný jas fasády budov (cd·m ⁻²); L_s největší průměrný jas značek (cd·m ⁻²). ^{a)} V případě kdy se neuplatňuje noční omezení, větší hodnoty nesmí být překročeny a menším hodnotám se má dát přednost.							

- E1 představuje skutečně tmavé prostory jako národní parky a chráněná území
- E2 představuje oblasti s velmi malým jasnem jako průmyslové a obytné venkovské zóny
- E3 představuje střední světlené oblasti jako průmyslová a obytná předměstí
- E4 představuje velmi světlé oblasti jako městská centra a obchodní zóny

4 Modelování vyzařovacích charakteristik VO do horního poloprostoru

Modelování vyzařovacích charakteristik VO do horního poloprostoru je provedeno v programu BUILDING DESIGN. Tento program je určen pro výpočty umělého osvětlení interiérů dle ČSN EN 12 464 – 1 a **veřejného osvětlení dle ČSN EN 13 201**. Program umožňuje provádět výpočty několika metodami. Například bodovou metodou (výpočet přímé složky osvětlenosti), metodou mnohonásobných odrazů (výpočet odražené složky osvětlenosti). Dále je možné provést výpočet udržovacího činitele, oslnění či mezního jasu vozovek. Svítidla je možno rozmístit manuálně zadáním souřadnic x, y, z nebo automaticky dle počtu nebo roztečí svítidel. Svítidla je možno v prostoru umísťovat i pod libovolným úhlem natočení. Program umožňuje využívat zobrazení ve 2D (plošné) a 3D (prostorové). Pro prohlížení typů a parametrů svítidel, včetně křivek svítivosti, slouží v programu databáze svítidel. Program umožňuje přímou oboustrannou komunikaci s programem AutoCad.

K modelování vesnice a vyzařovacích charakteristik jsem v práci využil nadstavbu programu BUILDING DESIGN, která umožňuje vložení sítě výpočetních bodů ve tvaru koule s výpočetními body zobrazujícími normálové osvětlenosti ve směru do středu koule. Sítě výpočetních bodů umožňují modelování křivek svítivosti nových svítidel složených z mnoha diskretních optických systémů složených k sobě v různých směrech vyzařování a disponují různými světelnými toky tak, aby bylo dosaženo požadované výsledné charakteristiky již ve formě modelu. Dojde ke značnému snížení nákladů při vývoji takovýchto typů svítidel. Tato síť výpočetních bodů se využívá i pro modelování vyzařování světelného toku jdoucího do horního poloprostoru z osvětlovacích soustav venkovního osvětlení jako podklad pro další astronomické výpočty, které se zaměřují na rušivé světlo a zvýšený závojevý jas oblohy.

4.1 Vyzařování do horního poloprostoru

Základem pro návrh byla tvorba příkladu modelu vesnice s komunikací a zástavbou. Namodelovaná je obec Libivá, která se nachází v Olomouckém kraji, blízko Mohelnice. Libivá má 240 obyvatel a počet domů ve vesnici je 86. Rozloha činí 3,83 km². GPS souřadnice jsou N 49° 47,85' E 16° 54,85'. Cílem je využití kulové sítě výpočetních bodů pro modelování vyzařování světelného toku jdoucího do horního poloprostoru z osvětlovacích soustav veřejného osvětlení. Vycházel jsem z technické dokumentace (viz příloha A) a porovnáváno bylo pouze veřejné osvětlení. Ve výpočtu není zahrnut světelný tok unikající z oken bytových domů, ani stromy, které mají také vliv na odražené světlo unikající do horního poloprostoru. Jako první byla navržena osvětlovací soustava pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek. Konkrétně jde o typ svítidel SITECO SR 100, které jsou v obci reálně instalovány viz foto v příloze B. Poté byla pro porovnání navržena osvětlovací soustava pomocí LED svítidel s vyzařovací charakteristikou pouze do dolního poloprostoru. Konkrétním typem svítidla je SITECO Streetlight 11 midi LED. Tato problematika se zaměřuje na zvýšený závojevý jas oblohy a na rušivé světlo, jež jsou stále hodně probíraným tématem.

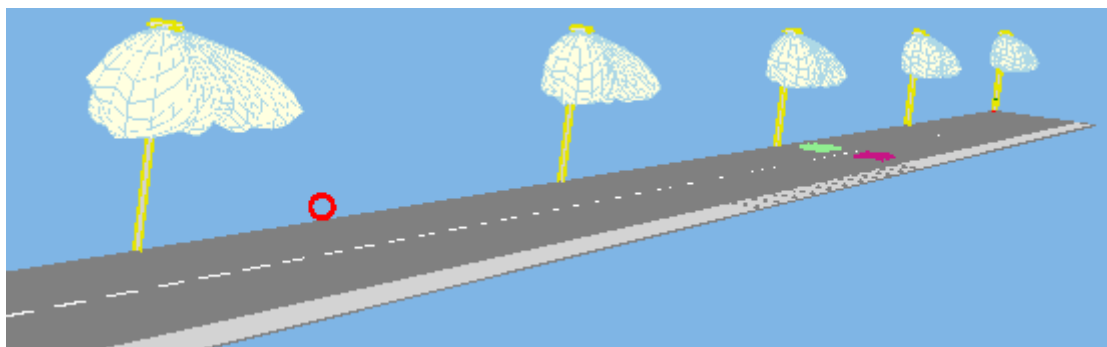


Obr. 4.1: Satelitní snímek obce Libivá [30]

4.1.1 Zatřídění komunikace

Pro hlavní silnici byla zvolena třída komunikace M3 a pro vedlejší cesty M5. Na základě znalostí světelné soustavy jsem provedl výpočty v programu Wils, aby odpovídaly normě, viz tabulky níže. Výpočty z programu jsou uvedeny v příloze C a reálné fotky komunikace M3 jsou uvedeny v příloze B.

Na obrázku 4.2 je návrh osvětlení komunikace dle normy ČSN EN 13 201. V tabulkách je pak vidět, že vypočtené hodnoty navrženého osvětlení komunikace M3 a M5 vyhovují této normě.



Obr. 4.2: Návrh soustavy svítidel podle normy CSN EN 13201

- *Vysokotlaké sodíkové výbojky SITECO SR 100*

Tab. 4.1: Požadavky dle normy CSN 13201 a vypočtené hodnoty pro komunikaci M5

Parametr	Minimální hodnota jasu (cd/m^2)	Rovnoměrnost (-)	Podélná rovnoměrnost (-)
Minimální hodnoty dle normy ČSN EN 13 201	0,5	0,35	0,4
Vypočtené hodnoty	0,91	0,58	0,56

Tab. 4.2: Požadavky dle normy CSN 13201 a vypočtené hodnoty pro komunikaci M3

Parametr	Minimální hodnota jasu (cd/m^2)	Rovnoměrnost (-)	Podélná rovnoměrnost (-)
Minimální hodnoty dle normy ČSN EN 13 201	1	0,4	0,6
Vypočtené hodnoty	1,05	0,58	0,61

- Svítidla SITECO Streetlight 11 midi LED

Tab. 4.3: Požadavky dle normy CSN 13201 a vypočtené hodnoty pro komunikaci M5

Parametr	Minimální hodnota jasu (cd/m^2)	Rovnoměrnost (-)	Podélná rovnoměrnost (-)
Minimální hodnoty dle normy ČSN EN 13 201	0,5	0,35	0,4
Vypočtené hodnoty	0,91	0,41	0,41

Tab. 4.4: Požadavky dle normy CSN 13201 a vypočtené hodnoty pro komunikaci **M3**

Parametr	Minimální hodnota jasů (cd/m^2)	Rovnoměrnost (-)	Podélná rovnoměrnost (-)
Minimální hodnoty dle normy ČSN EN 13 201	1	0,4	0,6
Vypočtené hodnoty	1,02	0,45	0,63

4.1.2 Model vesnice s osvětlením komunikace M3 a M5

Základem pro návrh byla tvorba modelu vesnice Libivá s komunikací a zástavbou. Třída komunikace byla zvolena na M3 a M5 viz předchozí bod. V blízkosti komunikace tvoří zástavbu rodinné domy. Komunikace s chodníkem i samotná zástavba vytváří pro osvětlovací soustavu a šíření jejího světelného toku překážky s určitou odrazností. Svítidla jsou rozmístěné 30 m od sebe ve výšce 8 m u komunikace M3 a 6 m u komunikace M5. Osvětlovací soustava je tvořena čtyřiceti sloupy se svítidly. U vysokotlakých sodíkových výbojek je sklon svítidel 5° . U LED 0°

Tab. 4.5: Parametry modelovaných objektů obce v programu Wils

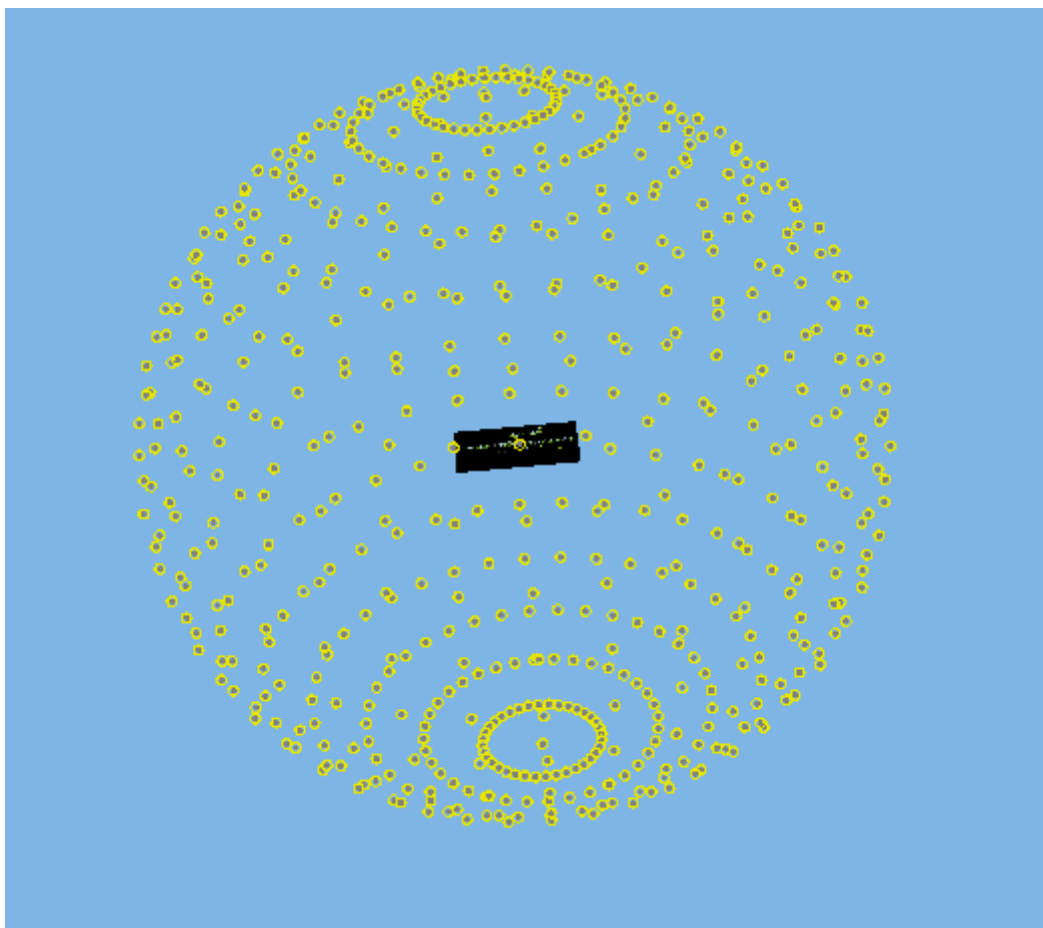
Parametr	Délka (m)	Šířka (m)	Výška (m)	Odrážnost (%)
1 x komunikace M3	850	7	-	9
8 x komunikace M5	1137,4	7	-	9
4 x chodník (zámková dlažba)	914,4	1,5	0,15	30
86 x dům (průměrná hodnota)	15	13	10	32
Tráva	-	-	-	22



Obr. 4.1: Navržený model obce (vlevo) a jeho výpočet (vpravo) v programu Wils

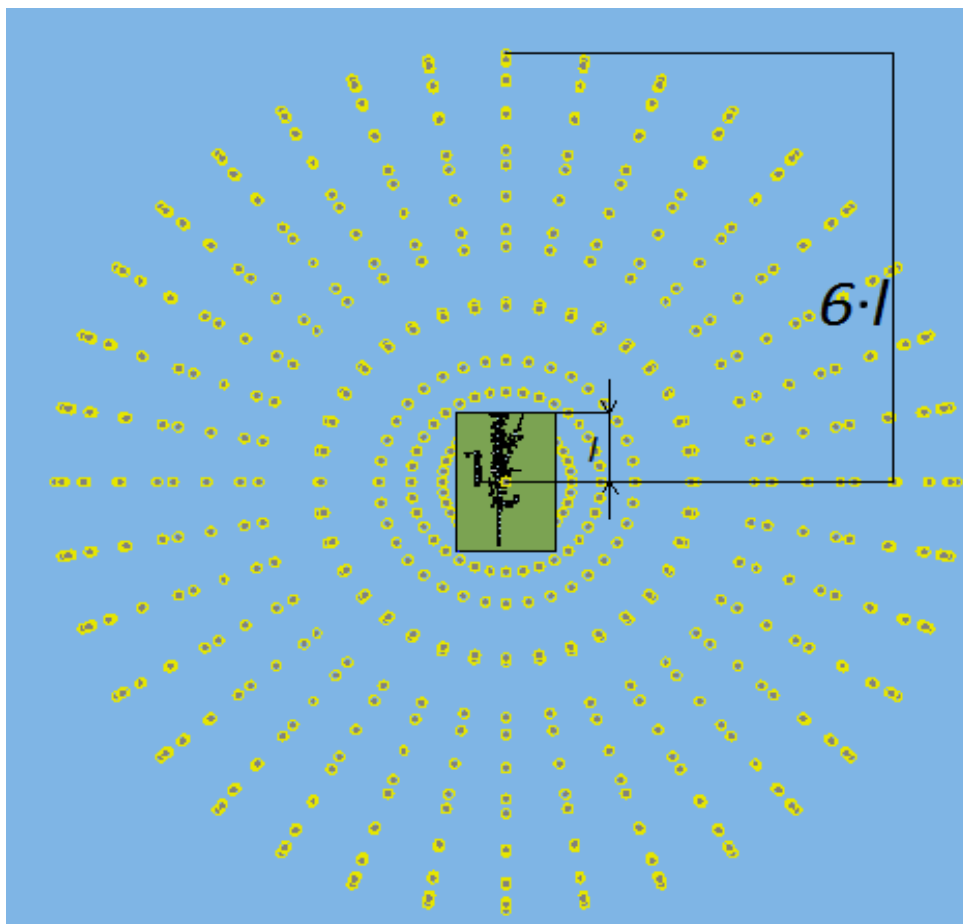
4.1.3 Sít' výpočetních bodů pro přímou a odraženou složku

Na obrázku 4.4 je vidět vesnice a sít' výpočetních bodů pro přímou a odraženou složku. Vesnice je umístěna do středu koule tvořené výpočetními body rozloženými v rovinách C po 10° a v rovinách gama také po 10° .



Obr. 4.4: Modelová situace umístění vesnice vůči kulové síti výpočetních bodů v programu Wils

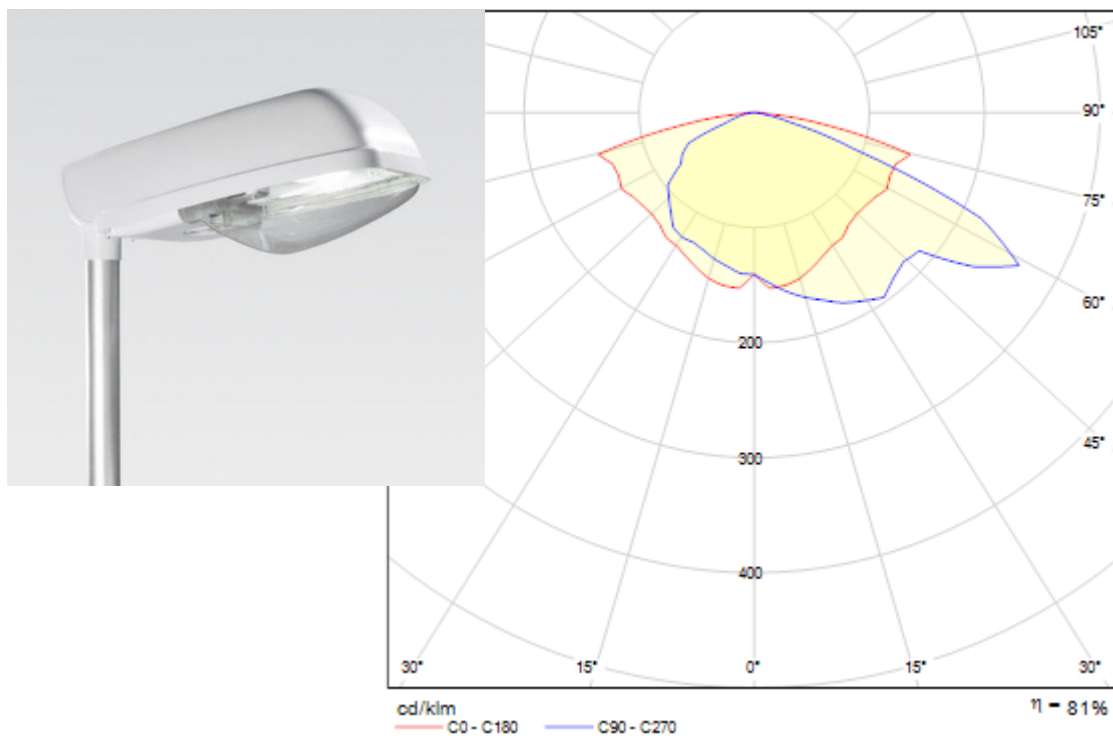
Na obrázku 4.5 lze vidět, že síť výpočetních bodů byla nastavena na šesti násobek nejdelšího rozměru modelu obce. To proto, aby se bylo možné na model dívat jako na bodový zdroj. Výpočty byly provedeny s udržovacím činitelem 1, tak aby bylo možno porovnávat vstupní a výstupní data zejména z pohledu zákona o zachování energie.



Obr. 4.5: Síť výpočetních bodů pro přímou a odraženou složku z modelu

4.1.4 Osvětlení komunikace pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek

V první fázi byl model vesnice osazen vysokotlakými sodíkovými výbojkami SITECO SR 100 s úhlem naklonění 5°. Lze tedy předpokládat, že část světelného toku se dostane do horního poloprostoru přímou složkou, tak i odrazem od okolních modelovaných objektů.



Obr. 4.6: Svítidlo SITECO SR 100 a jeho vyzařovací charakteristika z ltd dat výrobce

Tab. 4.6: Parametry vysokotlakých sodíkových výbojek SITECO SR 100

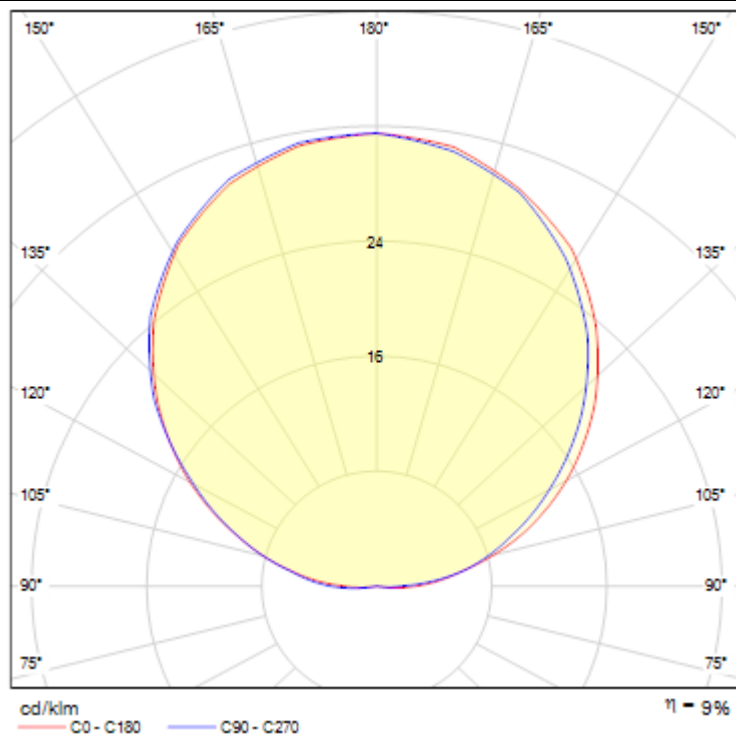
Svítidlo	40 x SITECO SR 100
Rozměry svítidla (mm)	807 x 300 x 358
Příkon svítidla (W)	176
Příkon soustavy (W)	7040
Světelný tok zdroje (lm)	17500
Světelný tok zdrojů soustavy (lm)	700000
Účinnost (%)	81,4
Světelný tok svítidla (lm)	14245
Světelný tok soustavy (lm)	569800

Získané hodnoty svítivosti pro jednotlivé roviny byly z ltd dat vybrány tak, aby odpovídaly krokům z ltd dat výrobce, tedy v rovinách C po 10° a gama po 30°.

- **Přímá a odražená složka do horního poloprostoru**

Tab. 4.7: Svítivost modelu obce pro jednotlivé roviny získané z ltd dat v programu Wils

<i>I</i> (cd/klm)	C10°	C40°	C70°	C100°	C130°	C160°	C190°	C220°	C250°	C280°	C310°	C340°
90°	2,1	0,8	1,3	1,8	0,5	1,2	0,7	0,8	1,8	3,2	2	3,2
100°	5,6	4,7	4,8	5,2	5,4	5,4	5,8	3,8	4,4	5,6	4,1	5,5
110°	10,2	8,6	9,1	9,6	9,5	9,6	10,4	8,8	8,8	10	8,2	10,2
120°	14,9	12,9	13,4	14	14,1	15	15,3	14,3	14	14,8	13,8	15
130°	19,4	17,9	18,1	18,6	19	19,7	20,1	19,8	19,8	19,9	19,4	19,7
140°	23,4	22,6	22,6	22,8	23	23,9	24,3	24	24,3	24,1	23,7	23,9
150°	26,8	26,4	26,3	26,3	26,6	27,1	27,6	27,7	27,4	27,5	27,1	27,3
160°	29,3	29,1	29	29,1	29,2	29,7	29,9	29,9	30,2	30	29,8	29,7
170°	30,9	30,8	30,7	30,7	30,9	31	31,2	31,3	31,4	31,3	31,2	31
180°	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5

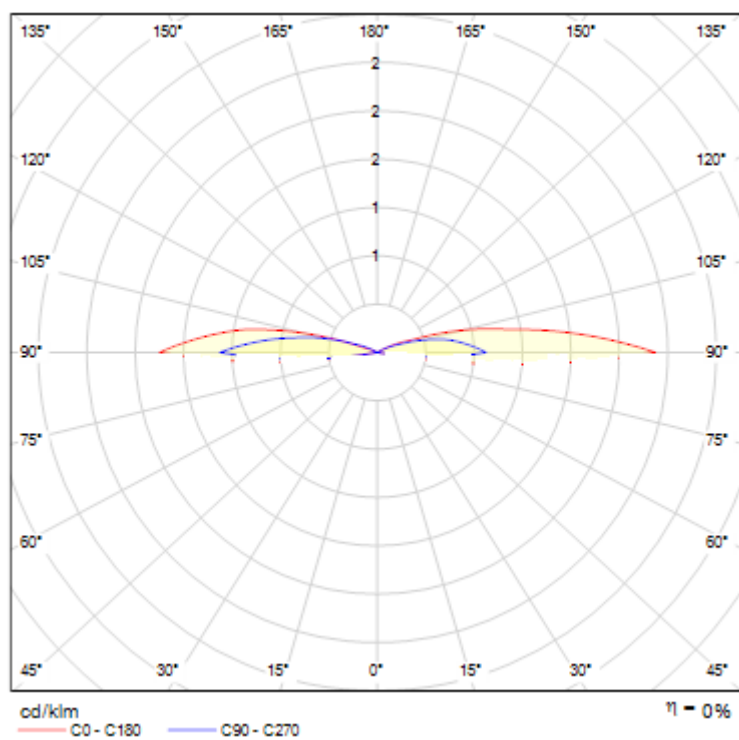


Obr. 4.7: Vyzařovací charakteristika obce přímou i odraženou složkou do horního poloprostoru

- **Přímá složka do horního poloprostoru**

Tab. 4.8: Svítivost přímé složky modelu obce pro jednotlivé roviny získané z ltd dat výrobce

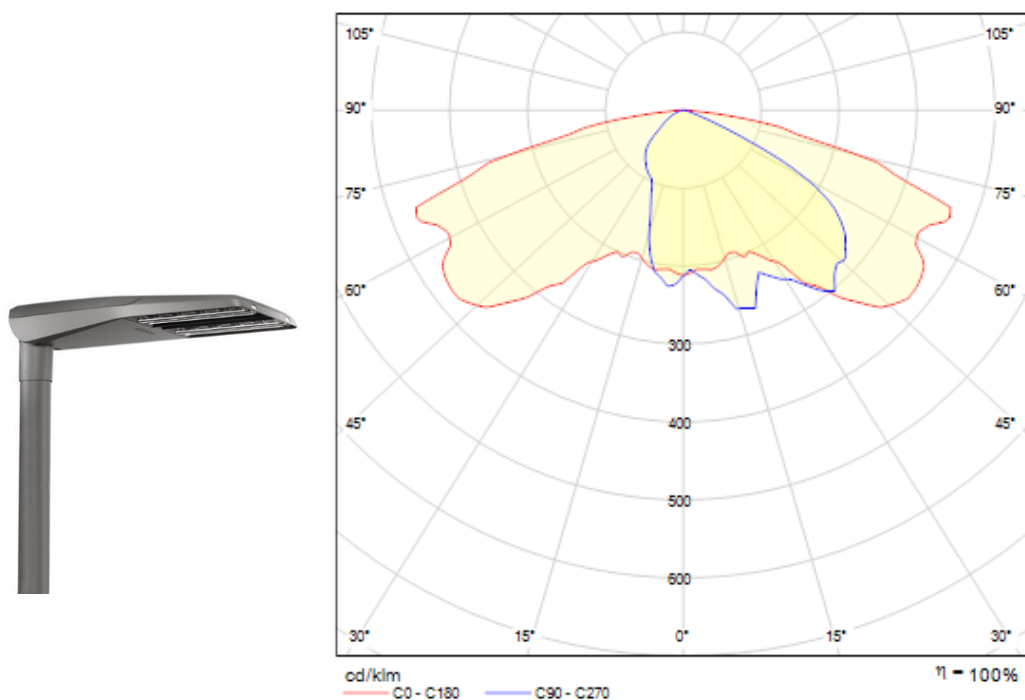
I (cd/klm)	C10°	C40°	C70°	C100°	C130°	C160°	C190°	C220°	C250°	C280°	C310°	C340°
90°	1,5	0,2	0,5	0,7	0,1	0,7	0,3	0,5	0,9	1,2	1,1	2,3
100°	0,9	1	0,5	0,5	1,2	0,8	0,9	0,9	0,5	0,6	0,6	0,8
110°	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
120°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0


Obr. 4.8: Vyzařovací charakteristika obce přímou složkou do horního poloprostoru

Na základě výše uvedených světelně technických parametrů osvětlovací soustavy a světelně technických parametrů kombinace osvětlovací soustava – odrazná plocha lze konstatovat, že vypočtená křivka svítivosti odražené složky vyzařuje jen do horního poloprostoru a její tvar se blíží difuznímu (cosinovu) zářiči. Podíl světelného toku do horního poloprostoru byl vypočten na 9,6 % světelného toku svítidel osvětlovací soustavy, což odpovídá hodnotě 67200 lm. Tento světelný tok se dělí na přímou a odraženou složku. Přímá složka tvoří 0,2 % (1400 lm) a odražená složka 9,4 % (65800 lm) z celkového světelného toku osvětlovací soustavy.

4.1.5 Osvětlení komunikace pomocí LED svítidel

Pro porovnání a zjištění změn vyzařovací charakteristiky modelu obce Libivá byla pro osvětlení stejné komunikace ve stejném geometrickém uspořádání zvolena osvětlovací soustava osazená LED svítidly. Tato svítidla vyzařují pouze do dolního poloprostoru a jsou určena pro osvětlování komunikací. Předpokládá se, že se veškerý světelný tok této osvětlovací soustavy dostane do horního poloprostoru jen odrazem od modelovaných objektů a povrchů.



Obr. 4.9: Svítidlo SITECO Streetlight 11 midi LED a jeho vyzařovací charakteristika z ltd dat výrobce

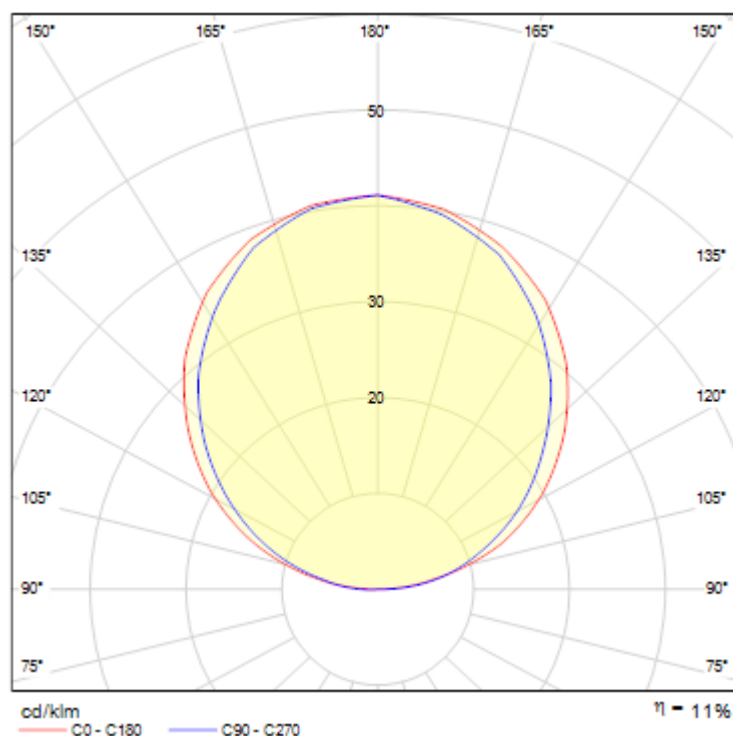
Tab. 4.9: Parametry LED svítidel SITECO Streetlight 11 midi LED

Svítidlo	40 x SITECO Streetlight 11 midi LED
Rozměry svítidla (mm)	780 x 376 x 118
Příkon svítidla (W)	70
Příkon soustavy (W)	2800
Světelný tok zdroje (lm)	7430
Světelný tok zdrojů soustavy (lm)	297200
Účinnost (%)	100
Světelný tok svítidla (lm)	7430
Světelný tok soustavy (lm)	297200

- **Přímá a odražená složka horního poloprostoru**

Tab. 4.10: Svítivost modelu vesnice pro jednotlivé roviny získané z ltd v programu Wils

<i>I</i> (cd/klm)	C10°	C40°	C70°	C100°	C130°	C160°	C190°	C220°	C250°	C280°	C310°	C340°
90°	0,6	0,6	0,7	1,2	0,3	0,5	0,4	0,3	0,8	1,7	0,8	1
100°	5,4	4	4,6	5,3	4,5	5	5,6	3,2	4,2	4,9	3,6	5,5
110°	12,2	9,3	10,1	10,9	10	11,3	12,7	9,2	9,8	10,9	8,9	11,8
120°	18,6	15	15,7	16,7	16,3	18,7	19,3	15,7	16,1	16,9	15,3	18,2
130°	24,5	21,6	21,7	22,4	22,8	24,9	25,6	23,1	22,7	23	22,4	24,5
140°	29,9	28,2	27,7	28,2	28,5	30,6	31,2	29,1	28,8	28,5	28,4	30,1
150°	34,4	33,5	33	33,1	33,8	35	35,6	34,7	33,5	33,5	33,6	34,8
160°	37,9	37,3	37	37,2	37,6	38,6	38,9	38,2	38,2	37,8	37,8	38,2
170°	40,1	39,9	39,7	39,7	40,1	40,4	40,7	40,5	40,5	40,2	40,3	40,3
180°	41,1	41,1	41,4	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1



Obr. 4.10: Vyzařovací charakteristika vesnice s LED osvětlovací soustavou SITECO Streetlight 11 midi LED

Na základě výše uvedených světelně technických parametrů osvětlovací soustavy a světelně technických parametrů kombinace osvětlovací soustava – odrazná plocha lze konstatovat, že vypočtená křivka svítivosti odražené složky vyzařuje pouze do horního poloprostoru a její tvar se blíží difuznímu (cosinovu) zářiči. Podíl světelného toku do horního poloprostoru byl vypočten na 11,5 % světelného toku svítidel osvětlovací soustavy, což odpovídá hodnotě 34178 lm. Jelikož svítidlo Streetlight 11 midi LED vyzařuje pouze do dolního poloprostoru je přímá složka jdoucí do horního poloprostoru nulová.

5 Kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení světelného toku jdoucího do horního poloprostoru

Tab. 5.1: Celkové porovnání modelu

Parametr	LED osvětlovací soustava	Sodíková osvětlovací soustava
Příkon osvětlovací soustavy (W)	2800	7040
Světelný tok osvětlovací soustavy (lm)	297200	700000
Světelný tok do horního poloprostoru (%)	11,5	9,6
Světelný tok do horního poloprostoru (lm)	34178	67200
Světelný tok přímý (%)	0	0,2
Světelný tok přímý (lm)	0	1400
Světelný tok odražený (%)	11,5	9,4
Světelný tok odražený (lm)	34178	65800

V tabulce 5.1 je celkové shrnutí namodelované vesnice z hlediska příkonů a vyzářeného světelného toku jdoucího do horního poloprostoru.

Lze tedy vidět, že z hlediska příkonů celé osvětlovací soustavy má sodíková soustava 2,5 x vyšší příkon, (2,4 x vyšší světelný tok) což má za následek zvýšené provozní náklady z ekonomického hlediska.

Dále lze jednoznačně prohlásit, že na velikosti rušivého světla, potažmo závoje jasů oblohy má největší vliv směr vyzařování jednotlivých svítidel a jejich geometrie. Celkový světelný tok, který byl do horního poloprostoru vyzářen vysokotlakou sodíkovou soustavou svítidel, je 2 x vyšší, než v případě LED osvětlovací soustavy.

Přímá a odražená složka světelného toku jdoucí do horního poloprostoru je uvedena v tabulce 5.1.

Závěr

Veřejné osvětlení je nezbytnou a důležitou součástí našeho života a nepochybuje se o jeho účelnosti, je ale zároveň nejčastěji označováno jako nejvýznamnější zdroj světelného znečištění. Je zapotřebí hlídat správné nasměrování, rovnoměrnost a s tím souvisí i výběr správného svítidla. Nejlepší případ by byl, kdyby se svítidla vypínala a regulovala podle provozu dopravy. U architektonického osvětlení je častou chybou směrovost světelného toku, správná instalace osvětlení vyřeší přesahy. Jako u veřejného osvětlení je dobré zvážit, zda má architektonické osvětlení svítit, když jej nikdo nevyužije. Osvětlení reklam spíše oslňuje, než aby lákalo zákazníky. U domovního osvětlení je nejčastější chybou nasměrování světelného toku do většího prostoru, než je zapotřebí. U průmyslových a obchodních prostorů se také nesvítí kam je potřeba. Areál nemusí být úplně celý osvětlený a nejlepší je kombinace svítidla s pohybovým senzorem.

V praktické části bylo hlavním cílem porovnat dvě osvětlovací soustavy veřejného osvětlení z hlediska vyzářeného světelného toku do horního poloprostoru. Veškeré výpočty byly provedeny v programu Wils. Jako příklad jsem si zvolil vesnici Libivá, která se nachází v Olomouckém kraji blízko Mohelnice. Jako první byl model vesnice osazen vysokotlakými sodíkovými výbojkami SITECO SR100. Podíl světelného toku do horního poloprostoru byl vypočten na 9,6 % světelného toku svítidel osvětlovací soustavy, což odpovídá hodnotě 67200 lm. Tento světelný tok se dělí na přímou a odraženou složku. Přímá složka tvoří 0,2 % (1400lm) a odražená složka 9,4 % (65800 lm) z celkového světelného toku soustavy. Pro porovnání a zjištění změn byla pro osvětlení stejné vesnice se stejnou komunikací a ve stejném geometrickém uspořádání zvolena osvětlovací soustava osazená LED svítidly SITECO Streetlight 11 midi LED. Podíl světelného toku do horního poloprostoru byl vypočten na 11,5 % světelného toku svítidel osvětlovací soustavy, což odpovídá hodnotě 37178 lm. Zde se jedná pouze o odraženou složku, protože LED svítidlo SITECO Streetlight 11 midi LED vyzařuje pouze do dolního poloprostoru a přímá složka jdoucí do horního poloprostoru je nulová.

Velmi důležité je zjištění, že osvětlovací soustava tvořená vysokotlakými sodíkovými výbojkami vyzařuje přímo do horního poloprostoru pouze 0,2 % celkového světelného toku jdoucího ze svítidel do horního poloprostoru. Celkový světelný tok jdoucí do horního poloprostoru se skládá z přímé a odražené složky. Z provedených výpočtů můžeme jednoznačně konstatovat, že velikost odražené složky je velmi dominantní a má velký vliv na velikost závojevého jasu než složka přímá. Odražená složka tedy ovlivňuje pozorovací podmínky astronomů a ovlivňuje i množství světla, které se od oblohy (hlavně zatažené) vrací zpět k zemi. Toto světlo pak může nepříznivě ovlivnit noční prostředí

Co se týče příkonů celé osvětlovací soustavy má sodíková soustava 2,5 x vyšší příkon (2,4 x vyšší světelný tok) což má za následek zvýšené provozní náklady z ekonomického hlediska. Dále lze konstatovat, že velikost rušivého světla, potažmo závojevého jasu oblohy má největší vliv směr vyzařování jednotlivých svítidel. Dominantně do horního poloprostoru vyzařuje odražená složka. Celkový světelný tok, který byl do horního poloprostoru vyzářen vysokotlakými sodíkovými výbojkami, je 2 x vyšší než v případě LED svítidel osvětlovací soustavy.

Použitá literatura




- [1] SOKANSKÝ K. a kol.: Světelná technika, Praha 2011, nakl. ČVUT Praha
- [2] ZÁVADA P., *Návrh metodiky vyhodnocení jasů v oblastech mezopického a skotopického vidění*, disertační práce, VŠB-TU Ostrava 2013
- [3] STARÝ P., *Světelné znečištění ovzduší*, diplomová práce, VŠB-TU Ostrava 2013
- [4] ČSN EN 12193. *Světlo a osvětlování. Osvětlení sportovišť*. Český normalizační institut 2008
- [5] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací: Část 2: Požadavky*. Český normalizační institut 2008.
- [6] ČSN EN 12464 – 2. *Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů: Část 2: Venkovní pracovní prostory*. Český normalizační institut, 2005.
- [7] HOLLAN, J. (2004) *Mapování světelné znečištění a negativní vlivy osvětlování umělým světlem na živou přírodu na území České republiky*. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2004.
- [8] SOKANSKÝ, K. a kol. *Racionalizace v osvětlování venkovních prostor*. Ostrava, 2005. Dostupné z: <http://www.csorsostrava.cz/publikace/racionalizace%20-%202005.pdf>
- [9] csorsostrava [online]. [cit 2018-04-04]. Dostupné z: <http://www.csorsostrava.cz/sborniky/Svetlo2007.pdf>
- [10] *Základní škola a Mateřská škola Albrechtice* [online]. [cit 27-04-2018]. Dostupné z: <http://www.zsalbrechtice.cz/cs/globe-at-night.html#.Whmu8VXia00>
- [11] Dostál F., *Měření a vyhodnocení rušivého světla*, diplomová práce, VŠB-TU Ostrava 2007
- [12] *Světlo v praxi / konference o novinkách v oblasti světla* [online]. [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <http://svetlovpraxi.cz/wp-content/uploads/2016/05/UGR-Ing.-Filip-Ko%C5%A1%C4%8D.pdf>
- [13] Baxant P., Jak budeme měřit “ světelné znečištění“ [on-line]. Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky. Dostupné z: <http://www.dql.cz/texty/mereni.html>
- [14] *Světelné znečištění – sviťme s rozumem* [online]. Dostupné z: <http://svetelneznecisteni.cz/ke-stazeni/>
- [15] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: *Control and lighting application*. Valladolid, 2002. Dostupné z: <http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>
- [16] Dostál F., *Rušivé světlo v podmínkách ČR*, disertační práce, VŠB-TU Ostrava 2011
- [17] Kopa O., *Optimalizace soustav veřejného osvětlení z hlediska environmentálních vlivů*, bakalářská práce, VŠB-TU 2013
- [18] SOKANSKÝ, K. a kol. Snižování energetické náročnosti venkovních osvětlovacích soustav. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2481-9. Dostupné z: http://www.csorsostrava.cz/publikace/EFEKT_2011.pdf

- [19] Veřejné osvětlení a jeho současný stav v České Republice. In: [Www.dvs.cz](http://www.dvs.cz) [online]. 2010 [cit. 201-010-27]. Dostupné z: <http://www.dvs.cz/clanek.asp?id=6437936>
- [20] NAVE, Carl R. *Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu*. [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/bright.html>
- [21] *Katedra 410* [online]. Dostupné z: <http://epe.vsb.cz/o-katedre/pracoviste/laborator-l01.html>
- [22] SOKANSKÝ, K., NOVÁK T a MAIXNER T. *Rušivé světlo Část 7. – Měření rušivého světla*. Světlo. 2007, č. 5. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36147
- [23] CIE. Technical report: *Guidelines for minimizing sky glow*. 1997. ISBN 3 900 734 83 6.
- [24] *Astronomický informační server astro.cz* [online]. Dostupné z: <http://www.astro.cz/clanky.html>
- [25] *Odborné časopisy* [online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41419.pdf>
- [26] SOKANSKÝ, K a kolektiv: *Racionalizace v osvětlování venkovních prostor*. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2005.
- [27] KONDZIOLKA, J. (2010a) *Architektonické osvětlení – vadí někomu? díl 1*. [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://www.astro.cz/clanek/4425>
- [28] *Světelné znečištění – sviťme s rozumem* [online]. [cit.27.04.2018] Dostupné z: <http://svetelnezneisten.cz/mapovani-tmy/metody-a-technika/>
- [29] *Moravian Instrument Inc.: Main page* [online]. Dostupné z: [http://www.gxccd.com/art:?](http://www.gxccd.com/art:)
- [30] Libivá – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Libiv%C3%A1>

Seznam příloh

Příloha na CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

-  Příloha A - technická dokumentace obce Libivá
-  Příloha B - foto komunikace M3 a svítidel SITECO SR 100
-  Příloha C - výpočty pro návrh komunikací M3 a M5